

**İÇ İÇE GEÇMİŞ SİLİNDİRİK, YÜKSEK BASINÇ ALTINDA
ÇALIŞABİLEN, YÜKSEK SIZDIRMAZLIĞA SAHİP
TİTANYUM TÜPÜN, ELEKTRON IŞIN KAYNAĞI YÖNTEMİ
KULLANILARAK DENEYSEL KAYNAK PARAMETRE
KARAKTERİZASYON ÇALIŞMASI İLE ELDE EDİLMESİ**

**EXPERIMENTAL E-BEAM PARAMETERS
CHARACTERIZATION ON THE NESTED CYLINDRICAL
ULTRA FINE LEAK TITANIUM Gr5 PRESSURE VESSEL**

TOLGA ÖZKAYA

DOÇ. DR. S. ÇAĞLAR BAŞLAMIŞLI
Tez Danışmanı

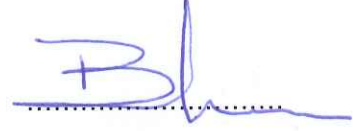
Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2019

TOLGA ÖZKAYA'nın hazırladığı "İç İçe Geçmiş Silindirik, Yüksek Basınç Altında Çalışabilen, Yüksek Sızdırmazlığa Sahip Titanyum Tüpün, Elektron Işın Kaynağı Yöntemi Kullanılarak Deneysel Kaynak Parametre Karakterizasyon Çalışması İle Elde Edilmesi" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

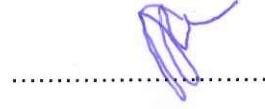
Prof. Dr. Bora YILDIRIM

Başkan



Doç. Dr. S. Çağlar BAŞLAMIŞLI

Danışman



Doç. Dr. Mehmet Bülent ÖZER

Üye



Dr. Öğr. Üyesi Bilsay SÜMER

Üye



Dr. Öğr. Üyesi Selçuk HİMMETOĞLU

Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** / /..... tarihinde onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Eşime ve Aileme

ETİK

Hacettepe Üniversitesi 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 üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

27/05/2019

TOLGA ÖZKAYA

YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan "**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**" kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ay ertelenmiştir.
- Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmiştir.


27/05/2019

Tolga ÖZKAYA

ÖZET

İÇ İÇE GEÇMİŞ SİLİNDİRİK, YÜKSEK BASINÇ ALTINDA ÇALIŞABİLEN, YÜKSEK SIZDIRMAZLIĞA SAHİP TİTANYUM TÜPÜN, ELEKTRON IŞIN KAYNAĞI YÖNTEMİ KULLANILARAK DENEYSEL KAYNAK PARAMETRE KARAKTERİZASYON ÇALIŞMASI İLE ELDE EDİLMESİ

Tolga ÖZKAYA

Yüksek Lisans, Makina Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. S. Çağlar BAŞLAMIŞLI

Mayıs 2019, 86 sayfa

Dünya genelinde ülkeler açısından savunma sanayi sektörü, sürekli ve değişen diplomatik dengelerden ötürü büyük önem arz etmekte olup; bu sektörün önemi günden güne artmaktadır. Ülkelerin savunma sanayi sektöründe önem verdikleri sistemlerden biri de hava savunma füzeleridir.

Bu bağlamda, bu tez çalışması kapsamında kızılötesi arayıcı başlığa sahip hava savunma füze sistemlerinde kullanılan arayıcı başlık soğutma performans ihtiyacını karşılamak amacıyla görev yapacak sistemin ana bileşenlerinden biri olan basınçlı tüpün tasarımı ve geliştirme aşamalarından bahsedilmiştir. Bu tasarım geliştirme çalışmalarının en kritik aşamalarından biri olan elektron ışın kaynağı prosesi ve proses parametreleri irdelenmiştir. Elektron ışın kaynağı kullanılarak, deney tabanlı yaklaşımla, tüp malzemesine yönelik kaynak parametre çalışma yapılmış olup; parametreler belirlenirken maksimum kaynak performansı açısından bir tasarım yaklaşımı geliştirilmiştir. Kaynak parametre çalışması, tahribatlı ve tahribatsız kaynak muayeneleri ile desteklenmiş olup, elde

edilen sistemin patlama ve sızdırmazlık performansı incelenmiştir. Elde edilen basınçlı tüpün patlama performansı açısından emniyet gereksinimini sağladığı ve 20 yıl kontrollü depo koşullarında saklandığı takdirde, sızdırmazlığının kabul edilebilir seviyelerde olduğu yapılan deneylerle ispatlanmıştır. Bu deneyler kapsamında deney düzenekleri tasarlanmış olup, ileride bu kapsamda yapılacak çalışmalarda test alt yapısının hazır olması büyük önem arz etmektedir.

Sonuc olarak bu çalışma ile, patlama basıncı 900 bar'dan fazla, He sızdırmazlık değeri $5 \times 10^{-8} \frac{\text{mbar.lit}}{\text{s}}$ den daha az (20 yıl görev ömrü sonunda 1 bardan az basıncı kaybı) ağırlığı 500 gr'dan az olan, içerisinde yaklaşık 90 ml gaz depolayabilen, titanyum gövde malzemeli ve elektron ışın kaynak yöntemi ile kapalı bir hacme dönüştürülen, i içe geçmiş çift silindirik yapıda bir basınçlı t p elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Elektron Işın Kaynağı, Yüksek Basıncı T p, Helyum Sızdırmazlık, Titanyum 6Al-4V (Grade 5) Alaşımı

ABSTRACT

EXPERIMENTAL E-BEAM PARAMETERS CHARACTERIZATION ON THE NESTED CYLINDRICAL ULTRA FINE LEAK TITANIUM Gr5 PRESSURE VESSEL

Tolga ÖZKAYA

Master of Science, Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. S. Çağlar BAŞLAMIŞLI

May 2019, 86 pages

Around the world, the defence industry is of great importance due to continuous and changing diplomatic balances. The importance of the industry is increasing day by day. At this point, air defence missile systems are one of the most important technologies for countries.

In this sense, in the scope of this thesis, the steps of the pressure vessel design which is one of the main components of the system that will serve to meet the IR seeker cooling performance requirement used in air defence missile systems, will be mentioned. The electron beam welding process and process parameters which are the most important part of these design development stages are examined. By developing experiment-based methods, the electron beam welding process and the process parameters have been studied. A design approach has been developed in terms of maximum welding performance when determining parameters. Electron beam welding parameter study is supported by destructive and non-destructive welding inspections. Besides, the burst pressure and He leakage performance of the system is examined. It has been proved experimentally that the pressure vessel provides safety requirements in terms of the burst pressure performance and for the controlled storage conditions about 20

years, the leakage is acceptable. Also, experimental set-ups are designed within the scope of these experiments. In the future, it is of great importance for the preparation of the test infrastructure and readiness for use in similar works.

As a result, by this study; a nested cylindrical titanium pressure vessel that has a burst pressure of more than 900 bar, He leakage rate less than $5 \times 10^{-8} \frac{\text{mbar.lit}}{\text{s}}$ (At the end of 20 years of service life, less than 1 bar pressure loss), weighs less than 500 g and having a capacity of approximately 90 ml has been obtained and qualified by using electron beam welding method.

Keywords: Electron Beam Welding, High Pressure Vessel, He Leakage, Titanium 6Al-4V (Grade 5) Alloy

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőması kapsamında, yıllar boyu büyük sabır gösteren, her zaman yanımda olduėunu hissettiren, yüksek lisans eėitimimi bitirmeme inancı olduėunu dűőündűėüm ve bu duyguyu bana geçiren, yetenekli ve özverili rehberim, danıőmanım Sayın Doç. Dr. S aėlar BAŐLAMıŐLI'ya; deėerli yorum ve eleŐtirileri, katkıları için jűri űyeleri Sayın Prof. Dr. Bora YILDIRIM'a , Sayın Doç. Dr. Mehmet Bűlent ŐZER'e, Sayın Dr. Őėr. űyesi Bilsay SűMER'e, Sayın Dr. Őėr. űyesi Selçuk HİMMETOėLU'na; bugűne kadar elde ettiėim meslekű tecrűbelerde ve bu tecrűbeleri elde ederken maddi, manevi desteklerini esirgemeyen çalıőma arkadaşlarıma, ROKETSAN A.Ő.'ye; bu çalıőmadaki katkılarından űtűrű LOGOS KİMYA ve Kale Pratt&Whitney ailesi'ne; her zaman baŐarılı olacaėımı dűőűnen ve beni sűrekli destekleyen dostlarım Eray Teoman ŐNDER ve Ali Emre UTAŐ'a ve hayat yolunda her iŐimde sırtımı dayadıėım, űműr boyu sıėınacak limanım olan eŐim Gizem MENEK ŐZKAYA'ya ve aileme; bitmek tűkenmek bilmeyen desteklerinden dolayı teŐekkűr ederim.

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | iii |
| TEŞEKKÜR | v |
| İÇİNDEKİLER | vi |
| ÇİZELGELER | viii |
| ŞEKİLLER | ix |
| SİMGELER VE KISALTMALAR | xiv |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1. Elektron Işın Kaynağı Yöntemi | 1 |
| 1.2. Elektron Işın Kaynağı Yöntemi Proses Değişkenleri | 12 |
| 1.2.1. Elektron Işın Kaynağı Proses Parametreleri | 14 |
| 1.3. Titanyum Malzeme Yapısı ve Titanyum Kaynak Yapılabilirliği | 16 |
| 1.3.1. Titanyum Kaynak Öncesi Yüzey Temizliği | 20 |
| 2. BASINÇLI TÜP SİSTEMLERİ | 24 |
| 2.1. Küresel Basınçlı Sistemler | 24 |
| 2.1.1. Mukavemet Analizi- İnce Cidarlı Küresel Tüp | 24 |
| 2.2. Silindirik Basınçlı Sistemler | 25 |
| 2.2.1. Mukavemet Analizi- İnce Cidarlı Silindirik Tüp | 25 |
| 2.2.2. Mukavemet Analizi- Kalın Cidarlı Silindirik Tüp | 27 |
| 3. BASINÇLI TÜP MEKANİK TASARIM GEREKSİNİMLERİ, ANALİTİK HESAPLAMALAR VE ARAYÜZ BİLGİLERİ | 28 |
| 4. TEST DÜZENEKLERİ | 32 |
| 4.1. Patlatma Test Düzeneği | 32 |
| 4.1.1. Patlatma Test Prosedürü | 34 |
| 4.2. Gaz Basınçlandırma Test Düzeneği | 34 |
| 4.2.1. Gaz Basınçlandırma Test Prosedürü | 35 |
| 4.3. Sızdırmazlık Test Düzeneği: | 36 |
| 4.3.1. Sızdırmazlık Test Prosedürü | 36 |
| 5. BASINÇLI TÜP KAPSAMINDA YAPILAN EBW KAYNAK DENEMELERİ, KAYNAK KARAKTERİZASYON - PARAMETRE ÇALIŞMALARI VE YAPILAN TESTLER | 39 |

| | |
|---|----|
| 5.1. EBW Parametre Karakterizasyon ve İlk Kupon Denemeleri | 41 |
| 5.2. İlk Kupon Denemeleri-Veri Analizi | 51 |
| 5.3. İlk Patlatma Testleri Sonuçları ve Değerlendirilmesi | 55 |
| 5.4. Alın Kaynak Arayüzlü İlk Kupon Denemesi ve Sonuçları..... | 62 |
| 5.5. Alın Kaynaklı Yeni Tüp Geometrisi – Statik Analiz ve Değerlendirme | 63 |
| 5.6. Nihâî Kupon Denemeleri-Veri Analizi | 67 |
| 5.7. Nihâî Sızdırmazlık ve Patlatma Testleri Sonuçları ve Değerlendirilmesi ... | 75 |
| 5.8. He Sızdırmazlık Basınç Kaybı Hesaplamaları | 81 |
| 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA..... | 82 |
| 7. YORUM | 83 |
| KAYNAKLAR..... | 84 |
| ÖZGEÇMİŞ | 86 |

ÇİZELGELER

| | |
|--|----|
| Çizelge 1-1 150 mm et kalınlığına sahip çelik malzemelerin kaynağı için elektron ışın kaynağı ve ark kaynak yöntemlerinin proses parametrelerinin karşılaştırılması[9] | 7 |
| Çizelge 1-2 Asitle Temizleme Çözeltisi İçerik Bilgisi..... | 21 |
| Çizelge 1-3 Son Durulama Suyunun Klor ve İletkenlik Değerleri..... | 21 |
| Çizelge 2-1 İnce ve Kalın Cidarlı Silindirik Geometrideki Tüpün Gerilim Hesaplamaları Karşılaştırmalı | 27 |
| Çizelge 3-1 Basıncılı tüp – pnömatik arayüz lazer kaynağı | 30 |
| Çizelge 3-2 İnce Cidarlı Silindirik Tüp Yaklaşımı- Basıncılı Tüp Dış Silindirik Kısımı Et Kalınlığı Hesaplaması | 31 |
| Çizelge 3-3 Kalın Cidarlı Silindirik Tüp Yaklaşımı- Basıncılı Tüp İç Silindirik Kısımı Et Kalınlığı Hesaplaması | 31 |
| Çizelge 4-1 Basıncılı tüp pnömatik arayüz 1/16” kılcal boru punta kaynağı | 33 |
| Çizelge 5-1 İlk kupon denemeleri, EBW kaynağı öncesi belirlenen değerler..... | 44 |
| Çizelge 5-2 İlk kaynak kuponu parametre seti ve elde edilen kaynak nüfuziyet değerleri | 45 |
| Çizelge 5-3 İlk basıncılı tüp patlama testi sonuçları..... | 57 |
| Çizelge 5-4 Basıncılı tüp statik analiz malzeme özellikleri..... | 65 |
| Çizelge 5-5 Deney tasarımı için belirlenen parametre seviyeleri | 68 |
| Çizelge 5-6 2K tam faktöriyel, çift tekrarlı, orta nokta ile deney tasarımı kupon matrisi ve sonuçlar | 69 |
| Çizelge 5-7 Nihai EBW Kaynağı Parametre Seti | 75 |
| Çizelge 5-8 Basıncılı tüp nihai patlatma test sonuçları ve hata modu | 76 |
| Çizelge 5-9 Basıncılı tüp nihai sızdırmazlık test sonuçları..... | 78 |
| Çizelge 5-10 Helyum cinsinden ASTM F2391-05 standardına göre sızdırmazlık sınıflandırması..... | 80 |

ŞEKİLLER

| | |
|---|----|
| Şekil 1.1 Elektron ışın tabancasının çalışma şematiği [1]..... | 1 |
| Şekil 1.2 Elektron ışın kaynağı anahtar deliği geometrisi [1] | 2 |
| Şekil 1.3 Malzemelerin elektron ışın kaynak yöntemi ile kaynak yapılabilme kabiliyetleri. 100- EBW yöntemi ile kaynak yapılması uygun malzemeler, Daha önceden başarılı sonuçlar alınmıştır. 75- Farklı erime noktalarına sahip malzemeler, Elektron ışın prosesi geliştirilerek kaynak yapılabilir. 50- Değerlendirme yapabilmek için yetersiz veri, Elektron ışın kaynağı ile denemeler yapılabilir. 25- Herhangi bir veri bulunmamaktadır. EBW yöntemi ile kaynak yapılabilirlik oranı düşük. 0- Arzu edilen kaynak kombinasyonu elde edilememiştir. EBW yöntemi ile kaynak yapılamaz. [2] | 3 |
| Şekil 1.4 Farklı kaynak yöntemleri için alın kaynağı, kaynak havuz geometrisi [2]. | 5 |
| Şekil 1.5 Elektron ışın kaynağı vakum odası, vakum miktarına göre sınıflandırılması [1]..... | 11 |
| Şekil 1.6 Kaynak nüfuziyet miktarı ve vakum seviyesi ilişkisi [1] | 12 |
| Şekil 1.7 Elektron ışın kaynağı yapılmış parçanın makro kesit görüntüsü ve kaynak bölge tanımlamaları [24]..... | 19 |
| Şekil 1.8 EBW ile kaynak yapılan malzemenin mikrosertlik değerinin kaynak birleşme noktasında, ısıdan etkilenmiş bölgede ve ana malzeme mesafeye bağlı olarak değişimi [24] | 19 |
| Şekil 1.9 Mukavemet değerlerinin ve uzama miktarının kaynak bölgesi ve etrafında gösterdiği karakteristik [24]..... | 20 |
| Şekil 1.10 Ø60 mm'lik Ti 6Al-4V çubuğun kimyasal ve mekanik özellikleri..... | 22 |
| Şekil 1.11 Ø70 mm'lik Ti 6Al-4V çubuğun kimyasal ve mekanik özellikleri..... | 23 |
| Şekil 2.1 Silindirik basınçlı tüp küresel uç bölgesi kalınlık geçişi | 27 |
| Şekil 3.1 Basınçlı tüp kesit görünümü ve ana ölçü tanımlamaları..... | 29 |
| Şekil 3.2 Basınçlı tüp üzeri pnömatik arayüzler kesit görünümü..... | 30 |
| Şekil 4.1 1/16" lik kılcal borunun punta kaynağına ait görüntü..... | 32 |
| Şekil 4.2 Su ile patlatma düzeneği diyagramı..... | 33 |
| Şekil 4.3 Su ile patlatma test düzeneği fotoğrafı..... | 33 |
| Şekil 4.4 Gaz basınçlandırma test düzeneği akış diyagramı | 36 |
| Şekil 4.5 Helyum sızdırmazlık testinde kullanılan vakum haznesi ve basınçlı tüpün hazne içine yerleşimi | 37 |

| | |
|--|----|
| Şekil 4.6 Sızdırmazlık testi akış diyagramı | 38 |
| Şekil 4.7 Sızdırmazlık test düzeneği..... | 38 |
| Şekil 5.1 EBW 88 kaynak tezgahına ait görüntü [28]..... | 39 |
| Şekil 5.2 Kaynak parametre denemeleri sistem modelleme yaklaşımı; elektron ışın kaynağı girdi, gürültü, çıktı ilişkisi | 40 |
| Şekil 5.3 Kaynak yüzeyi yüzey çöküntüsü (1) ve kaynak nüfuziyet miktarına ait X-ray makro görüntüsü | 41 |
| Şekil 5.4 İlk kupon denemelerinde kullanılan tüp geometrisi ve temel ölçüleri | 42 |
| Şekil 5.5 İlk kupon denemelerinde kaynak uygulanan yüzeylerin tanımlanması .. | 42 |
| Şekil 5.6 İlk kupon denemeleri kaynak bölgesi 1 | 43 |
| Şekil 5.7 İlk kupon denemeleri kaynak bölgesi 2 | 43 |
| Şekil 5.8 Kupon 1 kesiti makro görüntü (KN: 1.34, KYÇ: 0.11) / Kaynak bölgesi 2 | 46 |
| Şekil 5.9 Kupon 2 kesiti makro görüntü (KN: 1.08, KYÇ: 0.15) / Kaynak bölgesi 2 | 46 |
| Şekil 5.10 Kupon 3 kesiti makro görüntü (KN: 1.90, KYÇ: 0.18) / Kaynak bölgesi 2 | 47 |
| Şekil 5.11 Kupon 4 kesiti makro görüntü (KN: 1.89, KYÇ: 0.14) / Kaynak bölgesi 1 | 47 |
| Şekil 5.12 Kupon 5 kesiti makro görüntü (KN: 2.02, KYÇ: 0.14) / Kaynak bölgesi 1 | 48 |
| Şekil 5.13 Kupon 6 kesiti makro görüntü (KN: 2.05, KYÇ: 0.14) / Kaynak bölgesi 1 | 48 |
| Şekil 5.14 Kupon 7 kesiti makro görüntü (KN: 1.74, KYÇ: 0.15) / Kaynak bölgesi 1 | 49 |
| Şekil 5.15 Kupon 8 kesiti makro görüntü (KN: 1.67, KYÇ: 0.18) / Kaynak bölgesi 2 | 49 |
| Şekil 5.16 Kupon 9 kesiti makro görüntü (KN: 1.82, KYÇ: 0.28) / Kaynak bölgesi 2 | 50 |
| Şekil 5.17 Kupon 10 kesiti makro görüntü (KN:2.12, KYÇ: 0.08) /Kaynak bölgesi 2 | 50 |
| Şekil 5.18 Çizelge 5-2'deki kaynak nüfuziyet miktarlarının istatistiksel grafikleri..... | 51 |
| Şekil 5.19 Kaynak nüfuziyet miktarı üzerinde girdi parametrelerinin tekil etkileri.. | 52 |

| | |
|---|----|
| Şekil 5.20 Kaynak nüfuziyetinin ışın akımı ve kaynak hızı ikili etkisi ile karşılaştırılması | 54 |
| Şekil 5.21 Kaynak nüfuziyeti üzerinde ışın akımı tekli etkisi ve formülasyonu | 54 |
| Şekil 5.22 Kaynak nüfuziyeti üzerinde kaynak hızı tekli etkisi ve formülasyonu ... | 55 |
| Şekil 5.23 1 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip .. | 57 |
| Şekil 5.24 2 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip .. | 58 |
| Şekil 5.25 3 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip .. | 58 |
| Şekil 5.26 4 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip .. | 58 |
| Şekil 5.27 5 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip .. | 59 |
| Şekil 5.28 6 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip .. | 59 |
| Şekil 5.29 7 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip .. | 59 |
| Şekil 5.30 8 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip .. | 60 |
| Şekil 5.31 9 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip .. | 60 |
| Şekil 5.32 10 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip | 60 |
| Şekil 5.33 Çizelge 5-3 ve Şekil 5.29 da belirtilen 7 numaralı basınçlı tüpün patlama yüzeyinden alınan numunelerin X-ray makro görüntüsü, kaynak bölgesi 2 (Kaynak nüfuziyeti 1.37 ile 1.27 mm arasında çevresel olarak değişiklik göstermektedir.) | 61 |
| Şekil 5.34 Çizelge 5-3 ve Şekil 5.29 da belirtilen 7 numaralı basınçlı tüpün patlama olmayan yüzeyinden alınan numunelerin X-ray makro görüntüsü, kaynak bölgesi 1 (Kaynak nüfuziyeti 1.58 ile 1.34 mm arasında çevresel olarak değişiklik göstermektedir.) | 61 |
| Şekil 5.35 Alın kaynaklı kupon denemesinde kullanılan kupon geometrisi ve temel kaynak arayüz ölçüleri | 62 |
| Şekil 5.36 Tam nüfuziyetli alın kaynaklı 2.5 mm kaynak arayüzü cidar kalınlığına sahip | 63 |
| Şekil 5.37 Alın kaynağına uygun olarak düzenlenmiş tüp geometrisi | 64 |
| Şekil 5.38 Analiz örgü tipi, büyüklüğü ve yapısı | 65 |
| Şekil 5.39 1000 bar basınç değerinde iç silindirik kısımda oluşan yükler | 66 |
| Şekil 5.40 1000 bar basınç değerinde iç silindirik kısımda oluşan yüklerin kesit görüntüsü | 66 |
| Şekil 5.41 Kupon üzeri alınan kesit bölgeleri | 68 |
| Şekil 5.42 Çizelge 5-6 Kupon 1 sırasıyla A,B,C ve D kesitleri X-ray makro görüntüleri (Ortalama KN: 1.41) | 69 |

| | |
|--|----|
| Şekil 5.43 Çizelge 5-6 Kupon 2 sırasıyla A,B,C ve D kesitleri X-ray makro görüntüleri (Ortalama KN: 2.54) | 70 |
| Şekil 5.44 Çizelge 5-6 Kupon 3 sırasıyla A,B,C ve D kesitleri X-ray makro görüntüleri (Ortalama KN: 1.40) | 70 |
| Şekil 5.45 Çizelge 5-6 Kupon 4 sırasıyla A,B,C ve D kesitleri X-ray makro görüntüleri (Ortalama KN: 2.51) | 70 |
| Şekil 5.46 Çizelge 5-6 Kupon 5 sırasıyla A,B,C ve D kesitleri X-ray makro görüntüleri (Ortalama KN: 1.39) | 70 |
| Şekil 5.47 Çizelge 5-6 Kupon 6 sırasıyla A,B,C ve D kesitleri X-ray makro görüntüleri (Ortalama KN: 2.58) | 70 |
| Şekil 5.48 Çizelge 5-6 Kupon 7 sırasıyla A,B,C ve D kesitleri X-ray makro görüntüleri (Ortalama KN: 1.41) | 71 |
| Şekil 5.49 Çizelge 5-6 Kupon 8 sırasıyla A,B,C ve D kesitleri X-ray makro görüntüleri (Ortalama KN: 2.52) | 71 |
| Şekil 5.50 Çizelge 5-6 Kupon 9 sırasıyla A,B,C ve D kesitleri X-ray makro görüntüleri (Ortalama KN: 2.55) | 71 |
| Şekil 5.51 Çizelge 5-6 Kupon 10 sırasıyla A,B,C ve D kesitleri X-ray makro görüntüleri (Ortalama KN: 2.38) | 71 |
| Şekil 5.52 Tam faktöriyel model ilk çıktı görüntüsü..... | 72 |
| Şekil 5.53 Standardize edilmiş etkilerin Pareto Grafiği | 73 |
| Şekil 5.54 Sadeleştirilmiş nihai tam faktöriyel modelin çıktı görüntüsü..... | 73 |
| Şekil 5.55 Model varsayımlarının doğrulanması..... | 74 |
| Şekil 5.56 Kaynak nüfuziyeti nihai 2. dereceden regresyon modeli..... | 74 |
| Şekil 5.57 Çizelge 5-8 1 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip | 76 |
| Şekil 5.58 Çizelge 5-8 2 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip | 76 |
| Şekil 5.59 Çizelge 5-8 3 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip | 77 |
| Şekil 5.60 Çizelge 5-8 4 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip | 77 |
| Şekil 5.61 Çizelge 5-8 5 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip | 77 |
| Şekil 5.62 Vakum odası He kaçak seviyesi, 3.2×10^{-10} mbar.lts | 78 |

| | |
|---|----|
| Şekil 5.63 Çizelge 5-9 1 numaralı basınçlı tüp He kaçak seviyesi, 3.5×10^{-9} mbar.lts..... | 78 |
| Şekil 5.64 Çizelge 5-9 2 numaralı basınçlı tüp He kaçak seviyesi, 9.4×10^{-10} mbar.lts..... | 79 |
| Şekil 5.65 Çizelge 5-9 3 numaralı basınçlı tüp He kaçak seviyesi, 7.9×10^{-10} mbar.lts..... | 79 |
| Şekil 5.66 Çizelge 5-9 4 numaralı basınçlı tüp He kaçak seviyesi, 3.5×10^{-9} mbar.lts..... | 79 |
| Şekil 5.67 Çizelge 5-9 4 numaralı basınçlı tüp He kaçak seviyesi, 8.2×10^{-10} mbar.lts..... | 80 |

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

| | |
|--------------------|-----------------|
| mA | Miliamper |
| gr | Gram |
| rpm | Devir/dakika |
| A | Amper |
| N.m | Newton-metre |
| V | Volt |
| kV | kiloVolt |
| W | Watt |
| kW | kiloWatt |
| J | Jul |
| kJ | Kilojul |
| μ | Mikrometre |
| mm | Milimetre |
| mm^2 | Milimetrekare |
| kg/h | Kilogram/saat |
| min | Dakika |
| h | Saat |
| cm | Santimetre |
| Torr | Torr |
| α | Alpha |
| β | Beta |
| p_b | Patlama Basıncı |
| t | Kalınlık |
| D | Çap |
| D_i, \emptyset_i | İç çap |
| D_o, \emptyset_o | Dış çap |
| ms | Milisaniye |
| lt | Litre |
| ml | Mililitre |
| K | Kelvin |

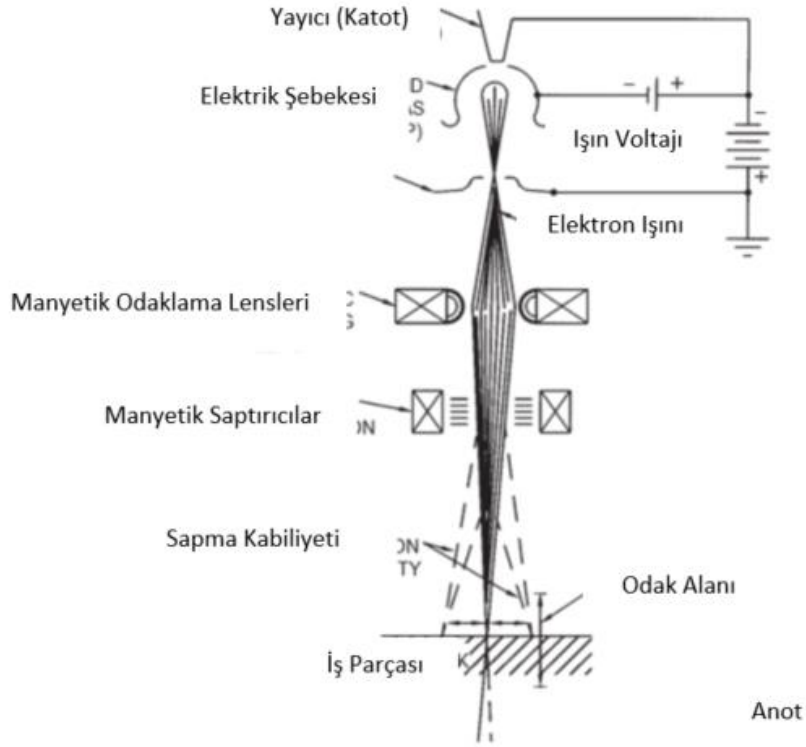
Kısaltmalar

| | |
|------|---|
| EBW | Elektron Işın Kaynağı (Electron Beam Welding) |
| HAZ | Isıdan Etkilenmiş Bölge (Heat Affected Zone) |
| FZ | Ergimiş Bölge (Fusion Zone) |
| TIG | Tungsten Soy Gaz (Tungsten Inert Gas) |
| MIG | Metal Soy Gaz (Metal Inert Gas) |
| MAG | Metal Aktif Gaz (Metal Active Gas) |
| TMCP | Termal ve Mekanik Olarak Kontrol Edilen Proses (Thermo-Mechanically Controlled Process) |
| GTWD | Elektron Tabancasının Kaynağa Olan Mesafesi (Gun to Weld Distance) |
| HCP | Altıgen Sıkı İstifli Kristal Yapı (Hexagonal Close Packed Crystal Structure) |
| BCC | Hacim Merkezli Kübik Yapı (Body Centered Cubic Structure) |
| SI | Uluslararası Birim Sistemi (Système International d'Unités) |
| UTS | Kopma Mukavemeti (Ultimate Tensile Strength) |
| YS | Akma Mukavemeti (Yield Strength) |
| VTS | Veri Toplama Sistemi |
| GT | Gaz Tankı |
| SV | Solenoid Vana |
| BP | Patlama Basıncı (Burst Pressure) |
| KN | Kaynak Nüfuziyeti |
| KYÇ | Kaynak Yüzey Çöküntüsü |
| BM | Ana Malzeme (Base Metal) |

1. GİRİŞ

1.1. Elektron Işın Kaynağı Yöntemi

Sürekli gelişen ve büyüyen sanayi sektörü, son ürün kalitesinden ödün verilmeden ve maliyet azaltılarak kârlılığı arttıracak proseslerin, teknolojilerin geliştirilmesini amaçlamaktadır. Teknolojisi 1880'li yıllara (Sir W. Crookes'un 1879'da platin anodu, katot ışını ile kaynatması) dayanmasına rağmen; ilk olarak kaynak yöntemi olarak kullanılması 1950'li yıllarda (Dr.Karl-Heinz Steigerwald 1951 yılında elektron ışık kaynağını elmas delmek için kullanması / British Patent:727460) olan EBW kaynak yöntemi; otomotiv, havacılık ve uzay, savunma sanayi endüstrilerinde kullanılmaktadır. Kaynak yapılacak parçalar üzerine, dolgu malzemesi kullanarak ya da kullanmadan, elektron tabancası vasıtası ile üretilen yüksek hızda elektron ışınlarının manyetik yönlendiricilerle yönlendirilerek, ışınların parça yüzeyine çarptığı esnadaki kinetik enerjisinin, ısı enerjisine dönüşmesi ile parçaların birleşmesini sağlayan bir kaynak yöntemidir [1], [2], [3]. Şekil 1.1'de elektron ışın tabancası çalışma prensibini belirten basitleştirilmiş gösterim bulunmaktadır [1].

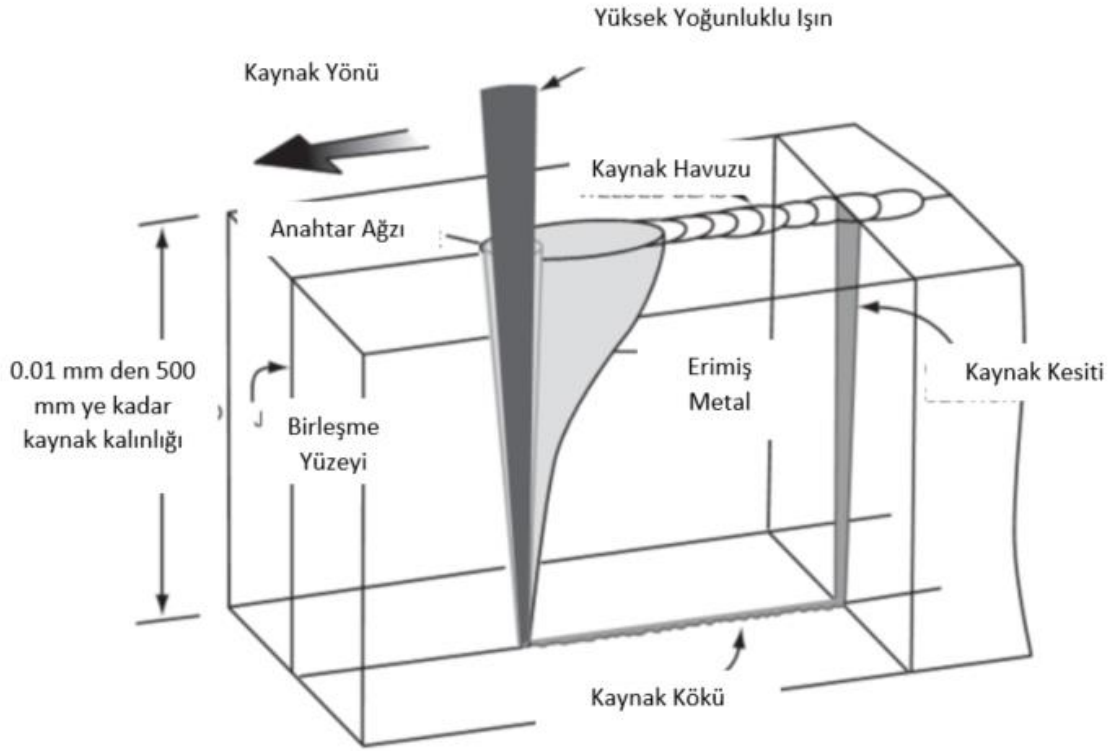


Şekil 1.1 Elektron ışın tabancasının çalışma şematığı [1]

Elektron ışın kaynağı ile yapılan kaynak işlemi 3 ana aşamada gerçekleşmektedir:

- I. Elektron ışınının kaynak yüzeyine ilk ulaştığı yerde, malzemede ergime başlar.
- II. Işının, kaynak arayüzü üzerindeki yerinin değiştirilmesi ile ışının ulaştığı yeni bölgede ergime meydana gelirken; önceki ergimiş bölgedeki malzeme bu bölgeye doğru akmaya başlar.
- III. Kaynak arayüzünde oluşan ergimiş metalin sürekli olarak akışıyla beraber anahtar deliği olarak tabir edilen kaynak oluşur.

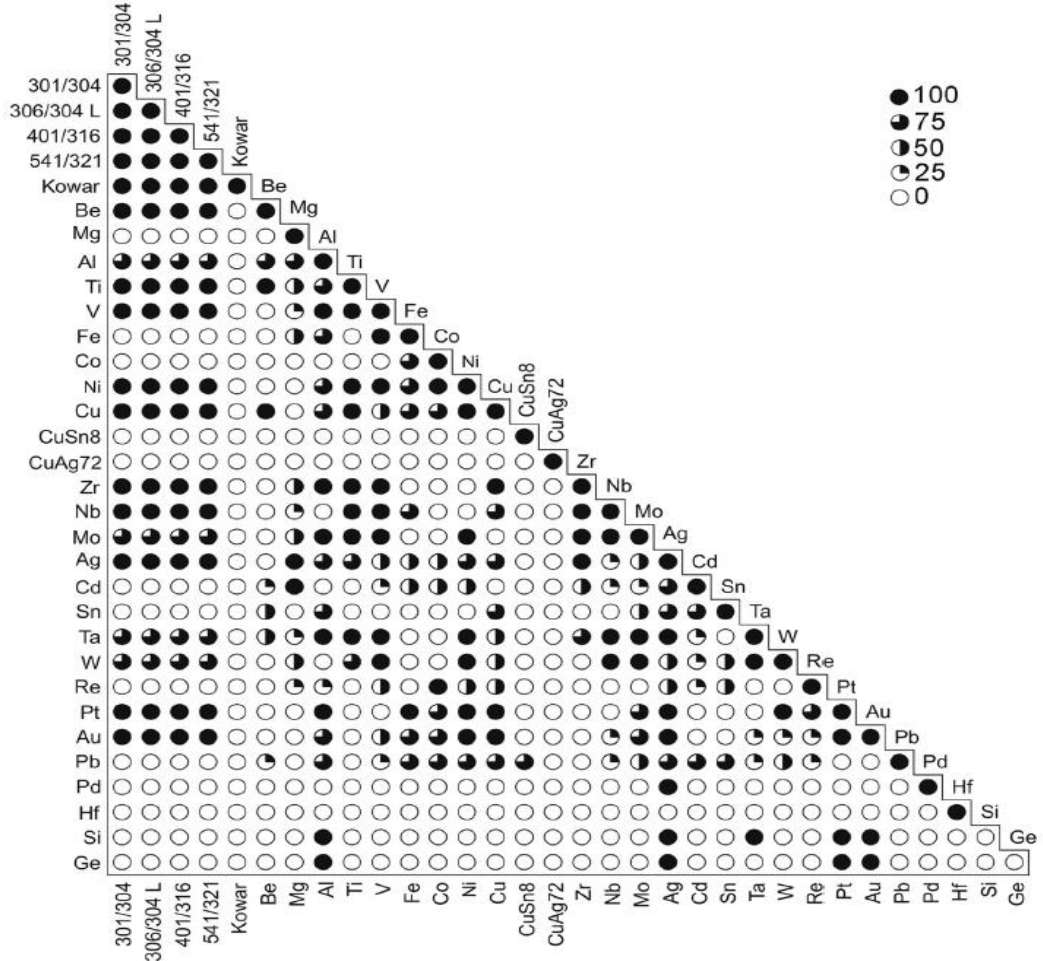
Elektron ışın kaynağı, kaynak dikişi ve anahtar deliği geometrisi şematik gösterimi Şekil 1.2'de belirtildiği gibidir [1].



Şekil 1.2 Elektron ışın kaynağı anahtar deliği geometrisi [1]

EBW yöntemi, çeliklerde 10 μ 'dan, 250-300 mm ve alüminyumlarda ise 500 mm kalınlığa sahip parçaların, tam nüfuziyetli olarak kaynatılabilmesine olanak sağlamaktadır. EBW kaynak yöntemi ile aynı tip malzemelerin farklı sınıfları ve zor kaynaklanabilir malzemelerin kaynakları yapılabilir: Örneğin, çeliğin farklı sınıfları bu kaynak yöntemi ile birleştirilebilir. Refrakter malzemeler (tungsten, molibden, niyobyum) ve kimyasal açıdan aktif malzemeler (titanyum, zirkonyum, berilyum)

kaynakları da yine bu yöntemle yapılabilmektedir. Bunun yanında kimyasal kompozisyon, ısı iletkenlik, termal genleşme katsayısı gibi özellikleri farklı olan iki farklı metalin EBW kaynak yöntemi ile kaynatılabilmesi mümkündür. EBW yöntemi ile kaynatılabilen malzemeler ve kombinasyonları Şekil 1.3'te belirtilmektedir [2].



Şekil 1.3 Malzemelerin elektron ışın kaynak yöntemi ile kaynak yapılabilirlik oranları. 100- EBW yöntemi ile kaynak yapılması uygun malzemeler, Daha önceden başarılı sonuçlar alınmıştır. 75- Farklı erime noktalarına sahip malzemeler, Elektron ışın prosesi geliştirilerek kaynak yapılabilir. 50- Değerlendirme yapabilmek için yetersiz veri, Elektron ışın kaynağı ile denemeler yapılabilir. 25- Herhangi bir veri bulunmamaktadır. EBW yöntemi ile kaynak yapılabilirlik oranı düşük. 0- Arzu edilen kaynak kombinasyonu elde edilememiştir. EBW yöntemi ile kaynak yapılamaz. [2]

Elektron ışın kaynak yöntemi farklı metallerin birbirleriyle kaynatılmasını sağlamanın en çarpıcı örneklerinden en önemlisi, sanayide çok kullanılan çelik ve alüminyum metallerininin, bu kaynak yöntemi ile birleştirilebilmesi durumudur. Ergime kaynağı ile birleştirilen çelik ve alüminyumlarda, kaynak ergime bölgesinde

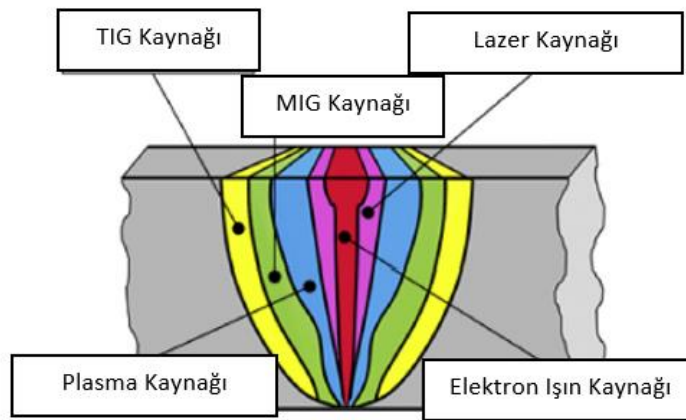
metaller arası faz yapısı bazı özel durumlar haricinde homojen olarak elde edilememektedir. Elektron ışın kaynağı ile yapılan kaynak işlemlerinde, kaynak havuzu metaller arası faz yapısı homojen olarak elde edilebilmekte olup; bu kaynak yöntemi ile elde edilen dar kaynak havuzundan ötürü, sünek malzemelerde bu durum mekanik performans açısından etkin bir role sahip değildir [2],[4].

Klasik kaynak yöntemlerinde kaynak arayüzünde, kaynak yapılan bölgenin mekanik performansını, kaynak yapılan ana malzemelerle aynı düzeyde tutabilmek için, kaynak havuz geometrisinin dış bükey şeklinde olması ve kaynak yapılan bölgenin güçlendirilmesi tercih sebebidir. Bu nedenle, kaynak yapılan parçaların birleştirilmesi için kaynak ağzı açılır. Kaynak ağzı açılan parçalarda bu dış bükey güçlendirmenin elde edilmesi için dolgu malzemesi olarak ana malzeme ile aynı metalurjik özelliklerde kaynak teli kullanılır. Elektron ışın kaynağında ise kaynak bölgesinde ısıdan etkilenmiş bölgenin dar olmasından dolayı, diğer konvansiyonel kaynak yöntemlerine göre malzeme özellikleri daha az etkilenmektedir. Bu nedenle, çoğunlukla elektron ışın kaynağı ile kaynak yapılacak parça yüzeylerinde kaynak ağzına ve dolgu malzemesine ihtiyaç duyulmamaktadır. EBW ile yapılan kaynak işleminde kaynak bölgesinde dış bükey bir güçlendirmeye ihtiyaç duyulması halinde, kaynak yönteminin nüfuziyet kabiliyetlerinden ötürü ana malzeme dolgu malzemesi kullanılacak şekilde kaynak arayüzü hazırlanabilir [5], [6].

Elektron ışın kaynağı prosesiyle, yüksek kalitede ve hassasiyette bağlantı elde edebilmek, malzemenin kaynak yapılabilirliğine; kaynak dolgu malzemesi kullanılacak ise kaynak dolgu malzemesinin diğer kaynak yöntemlerinde olduğu gibi kaynak yapılacak parçalarla metalurjik uyumluluğuna bağlıdır. Bu yöntem ile farklı malzemelerin kaynatılabilmesi mümkündür. Kaynak işleminde dolgu malzemesi kullanılacaksa, kaynak yapılacak olan ana parçalarla, dolgu malzemesinin kimyasal kompozisyon olarak uyumlu olması kritiktir. Bunun yanında, dolgu malzemesi kullanılmadan kaynak yapılabilme durumu söz konusu olduğunda dahi farklı malzemelerin birleşme yüzeylerinde oluşan kaynak havuzunun homojen olarak elde edilmesi gerekmektedir. Bunun için dolgulu ya da dolgusuz EBW kaynağında parçaların elektrokimyasal uyumluluğu da büyük önem arz etmektedir. Bu sebeplerden ötürü, elektron ışın kaynak yöntemi ile birleştirilen parçalarda, kaynak performansı açısından deneysel çalışma yapılması tavsiye edilmektedir [5].

Elektron ışın kaynağı yöntemi ile kaynak kalınlığı 40 mm'den fazla olan parçalarda tam nüfuziyetli kaynakta, kaynak kökünde ergimiş metalin akmasını engellemek için kaynak kök tarafında destek metal parçaları kullanılabilir. Bu durum kapalı geometrilerle yapılan kaynak işlemlerinde çok mümkün olmamakla birlikte; düz parçalarda kullanılması tavsiye edilmektedir. Metal akmasını önlemek için kaynak prosesinde kullanılan parametre değerleri önem arz etmektedir [2], [5]. Bununla beraber bu kaynak yöntemi, kapalı hacim geometrilerinde kullanıldığı takdirde ışının malzemeye ilk ulaştığı kaynak yüzeyinde çöküntü meydana gelmektedir. Kaynak yüzeyinde oluşan bu çöküntüden kaçınmak için kaynak yapılan parçalar arasındaki boşluğun maksimum miktarı, tam nüfuziyetli kaynak kalınlığının %1'i kadar veya daha az olmalıdır [1]. Bundan dolayı kapalı hacim geometrisi ile yapılacak olan kaynak işlemlerinde kaynatılacak parçalar, kaynak öncesi, eğer mümkünse sıkı geçme toleranslarıyla kaynak arayüzünden birbirlerine bağlanacak şekilde geçmelidirler.

Bunun yanında kaynak havuzu geometrisi ve boyutları, farklı kaynak yöntemleri için değişiklikler göstermektedir. Şekil 1.4'te farklı kaynak yöntemleri ile alın kaynağı yapılan parçalarda, kaynak havuz geometri karşılaştırması belirtilmektedir. Elektron ışın kaynağı ile sağlanan yüksek yoğunluklu ısı girdisi ve kaynak parçası üzerinde elde edilebilen dar kaynak havuzu sayesinde, iş parçası üzerinde ısı girdisinden dolayı oluşan deformasyonlar en aza indirilebilmektedir.. EBW ile tek pasoda tam nüfuziyetli kaynak dikişi elde edilebildiğinden, parça üzerinde ısı girdisinden dolayı oluşan termal deformasyon TIG, MIG/MAG ve Plazma kaynaklarına göre daha azdır [2], [7].



Şekil 1.4 Farklı kaynak yöntemleri için alın kaynağı, kaynak havuz geometrisi [2]

Kaynak işlemlerinde, metali eritmek için gerekli olan ısı miktarı ve kaynak esnasında meydana gelen ısı kayıpları, ısı kaynağı tarafından sağlanması gereken miktarı belirlemektedir. Kaynak yöntemleri arasında ısı kayıpları karşılaştırıldığında, elektron ışın kaynağı yöntemi, diğer kaynak yöntemlerine göre daha verimlidir. Katı hal lazer kaynak yöntemi sağladığı enerjinin %4'ünü, yeni nesil fiber lazer kaynak yöntemi %25-50'sini kaynak için kullanılabılırken; bu değer EBW yöntemi için %60-70 civarlarındadır [7]. Bununla birlikte lazer ışın kaynağının verimliliği, kaynak yapılacak malzemelerin fiziksel özelliklerine, kimyasal bileşimlerine ve kaynak yapılacak malzeme yüzeyinin lazer ışınını yansıtma oranına bağlıdır [5], [8].

Çizelge 1-1'de elektron ışın kaynağı ile endüstride sıkça kullanılan MIG/MAG (Eriyen Elektrodlu Gaz Altı Ark Kaynakları) ve Toz Altı Ark Kaynağı ile 150 mm kalınlıktaki çelik parçaların kaynatılması için kaynak yöntemlerine göre proses farklılıkları bulunmaktadır [9]. Elektron ışın kaynağı ile tek pasoda kaynak yapılabildiğinden, kaynak sürelerinin diğer ark kaynak yöntemlerine göre kısalığı, elektron ışın kaynağı ile elde edilen kaynak havuzunun diğer ark kaynak yöntemlerine göre azlığı, elektron ışın kaynağı ile malzemeyi eritmek için harcanan enerjinin diğer ark kaynak yöntemlerine göre en az 3 kat fazla oluşu bu çalışmadaki dikkat çekici farklılıklardır. Burada elektron ışın kaynağının kaynak proses verimliliği açısından üstün olmasının yanı sıra en önemli üstünlüğü, ergime bölgesinin diğer yöntemlere göre dar olması nedeniyle, güç yoğunluğunun fazla olmasıdır. Elektron ışın kaynak yöntemi yüksek veya ultra yüksek dayanımlı çeliklerin kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde de kullanılmıştır. Zhang ve arkadaşlarının [10], uçak iniş takımlarında, mühimmat sistemlerinde, şasi güçlendirmelerinde kullanılan 300M çeliklerinde, elektron ışın kaynak yöntemi ile kaynağından sonra malzemelerin, ısı işlemsiz ve ısı işleme tabi tutularak kullanılması üzerine yaptığı çalışmada; kaynak sonrası ısı işlemin mekanik özelliklerinde iyileşme olduğunu tespit etmişlerdir. Elliot [11], karbon mangaz çeliklerinin, elektron ışın kaynağı yöntemi ile birleştirilmesinden sonra, kaynak bölgesinde meydana gelen malzeme mikro yapısındaki değişiklikleri incelemiştir.

Çizelge 1-1 150 mm et kalınlığına sahip çelik malzemelerin kaynağı için elektron ışın kaynağı ve ark kaynak yöntemlerinin proses parametrelerinin karşılaştırılması[9]

| Parametreler | Kaynak Prosesleri | | |
|---------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| | Elektron Işın Kaynağı | MAG Kaynağı | Toz Altı Ark Kaynağı |
| Akım | 0.27 A | 260 A | 510 A |
| Voltaj | 150 kV | 30 V | 28 V |
| Kaynak Havuzu Alanı | 800 mm ² | 2100 mm ² | 5900 mm ² |
| Kaynak Pasosu | 1 | 35 | 143 |
| Dolgu Malzemesi | 0 | 23 kg | 66 kg |
| Ergime Verimliliği | 7.7 kg/h | 5 kg/h | 9 kg/h |
| Kaynak Süresi | 27 min | 4 h 35 min | 7 h 27 min |

Bu çalışmada da, elektron ışın kaynak yöntemi ile kaynatılan malzemelerin mikro tanecik yapısı ve özellikleri, önemli ölçüde kaynak parametrelerine ve elektron ışın kaynağı koşullarına bağlı olduğu belirtilmiştir. Malzeme özelliklerinden en çok malzeme tokluğunun etkilendiğinin üzerinde durulmuştur. Maurer ve arkadaşları [12], genellikle yapı ve inşaat çeliği olarak bilinen TMCP çeliklerle yaptıkları çalışmalarında, elektron ışın kaynağı farklı parametre denemelerinin kaynak bölgesi mikro yapısı ve özelliklerinde geniş bir ölçüde değişikliğe sebep olabildiğini, farklı kaynak enerji seviyelerini karşılaştırarak göstermişlerdir. Bunun yanında Weglowski ve arkadaşları [2], [13], [14], [15], yüksek mukavemetli çeliklerden S690QL ve S960QL ile yaptıkları elektron ışın kaynağı kaynak denemeleri testleri sonucunda, kaynak yapılan bölgenin çekme dayanımları ile ana malzemelerin çekme dayanımlarını aynı olarak elde edilebildiğini ortaya çıkarmışlardır.

Elektron ışın kaynak yöntemi ile ilgili yapılan çalışmalar ve elde edilen tecrübeler sonucunda, bu kaynak yönteminin diğer yöntemlere göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Diğer kaynak yöntemleri ile karşılaştırıldığında, avantajları aşağıda belirtildiği gibidir [1], [2], [16]:

- I. Işın gücü seviyesi kapsamında 1 kW ile 300 kW arasında güç sağlamasının yanı sıra, kaynak yapılabilir malzeme kalınlığı 0.01 mm ile 300 mm arasında değişmektedir.

- II. Kaynak parçası üzerine odaklanmış elektron ışını, yüksek bir enerji yoğunluğu ile parça üzerine çarpar. Parça üzerine gelen elektron ışının çok küçük bir alana odaklanması, diğer ark kaynağı yöntemlerine göre, kaynak bölgesinde enerji yoğunluğu 100-1000 kat aralığında daha fazla elde edilmektedir. Bu durum, et kalınlığı yüksek olan parçaların, tek pasoda kaynatılabilmesini sağlamaktadır.
- III. Yüksek enerji yoğunluğu ($10^7 W.cm^{-2}$) ile kaynak yapabilme kabiliyetinden dolayı; parçaya iletilen toplam enerji miktarı nispeten düşüktür. Diğer ark kaynağı yöntemlerine göre, parça üzerinde kaynaktan ötürü oluşan çarpıklıklar, bozulmalar, termal etkileri azaldığı gibi; parçalar üzerinde daha dar HAZ elde edilebilmektedir.
- IV. Ark kaynak yöntemlerinde yardımcı bir dolgu malzemesi kullanılarak ve çoklu pasoda kaynak yapılabilirken; EBW ile tek pasoda ve yardımcı bir dolgu malzemesi kullanmaya ihtiyaç olmadan; kaynak nüfuziyet miktarının, kaynak genişliğine oranının yüksek olduğu kaynak dikişleri elde edilebilmektedir.
- V. Çoğunlukla elektron ışın kaynağının vakum ortamında yapılmasından dolayı; kaynak bölgesinde atmosferde bulunan gazlardan dolayı kirlenme en aza indirilmektedir. Vakumlu ortamda yapılan bu kaynak yöntemi ile kaynak metali tarafından atmosferik koşullarda maruz kalınan oksijen ve hidrojen gazlarından, kaynak bölgesi korunmuş olur. Bu durum, parça üzerinde mekanik performansta azalmaya sebep olan oksijen ve hidrojen gevrekleşmesini ortadan kaldırmaktadır.
- VI. Elektron ışın kaynağı vakum altında yapıldığı için, kaynak esnasında, oksitlenmeyi önlemek için ark kaynak yöntemlerinde olduğu gibi koruyucu gaz kullanmaya ihtiyaç bulunmamaktadır.
- VII. Yüksek güç yoğunluğu sayesinde; konvansiyonel kaynak yöntemleri ile kaynak yapılması zor ve imkansız olarak görülen, yüksek termal iletkenliğe sahip, ısıya dayanıklı refrakter malzemeler ve farklı metallerin birbirleri ile kaynatılabilmesi, EBW ile mümkündür.
- VIII. EBW, vakum altında kontrollü bir ortamda yapıldığından; kaynağı optimize etmek, ortamdaki ve kaynak operasyonundan kaynaklı hataları azaltmak için parametre optimizasyonu yapmaya elverişlidir.

- IX. Kaynak parametrelerinin ayarlandıktan sonra prosesin tekrarlanabilir olması, kaynak ve ürün kalitesi açısından, seri üretim için büyük önem arz etmektedir.
- X. Basit düz kaynak dikişlerinin elde edilmesinin yanı sıra, 3 boyutlu eş zamanlı olarak kompleks kaynak geometrilerinin kaynak yapılabilmesine de kaynak tezgah kabiliyetlerine göre imkan sağlamaktadır.
- XI. Lazer ışın kaynağı ile karşılaştırıldığında; kaynak bölgesi malzeme ergimesi için harcanan enerjinin verimliliği elektron ışın kaynağında daha yüksektir. Bunun yanında bakır ve alüminyum alaşımlı malzemelerde görülen lazer ışını yansımaları sorunu, elektron ışın kaynağında görülmemektedir.

Diğer kaynak yöntemleri ile karşılaştırıldığında; elektron ışın kaynağı dezavantajları aşağıda belirtildiği gibidir [1], [2], [17] :

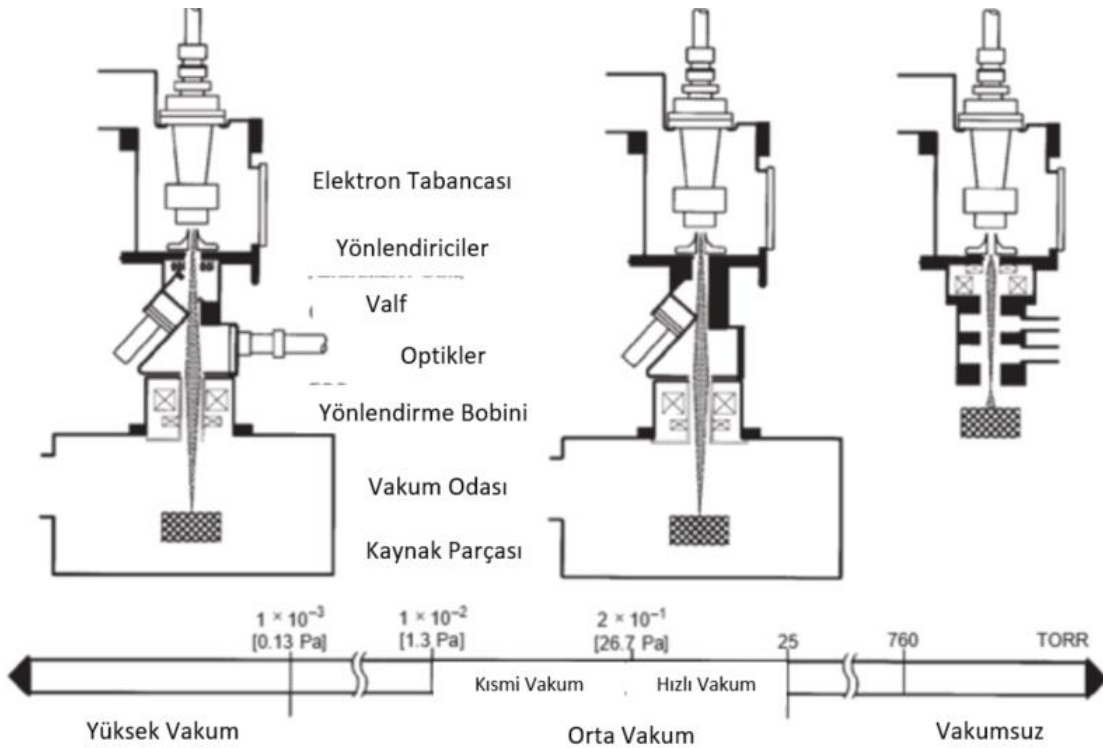
- I. Elektron ışın kaynağı yatırım maliyeti, diğer konvansiyonel ark kaynak sistemlerine göre daha fazladır.
- II. Elektron ışın kaynağı ile dar kaynak havuzu elde edilmesi, malzeme mekanik performansı açısından büyük bir avantaj sağlamasına rağmen; kaynak fikstürü, parçaların hassas bir şekilde üretilmesi ve kaynak cihazı içinde hassas bir şekilde konumlandırılması, diğer kaynak yöntemlerine göre daha fazla önem arz etmektedir.
- III. Genellikle vakum odası içerisinde yapılan bu kaynak yöntemi için sistemde bulunan vakum pompalarının performansı, vakum odası boyutları; vakumlama zamanı açısından büyük öneme sahiptir. Vakumlama zamanının artması, üretim maliyetlerini arttırmaktadır.
- IV. Kaynak yapılan yüzeyler arasındaki boşluğun, kaynak arayüzü kalınlık değerinin %1'inden daha düşük olması gerekmektedir. Bunun yanında yapısal olarak bir sıkıntı çıkarmayacağı takdirde; kaynak arayüzünün birbirine sıkı geçme toleransı ile geçirilmesi kaynak performansı açısından büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle kaynak arayüz parçalarının hassas olarak işlenmesi ve kaynak öncesi fikstürü ile hassas bir şekilde monte edilmesi gerekmektedir.
- V. Kaynak yapılacak olan parçaların temizliği, cihaz içi vakum sistemleri çalışma performansı ve ömrü açısından önemlidir. Bunun yanında kaynak arayüzünün, hem mekanik performans hem de kaynak kalitesi açısından

temiz olması gerekmektedir. Bu nedenlerden ötürü kaynak yapılmadan önce parçaların uygun kimyasallarla temizlenmesi gerekmektedir.

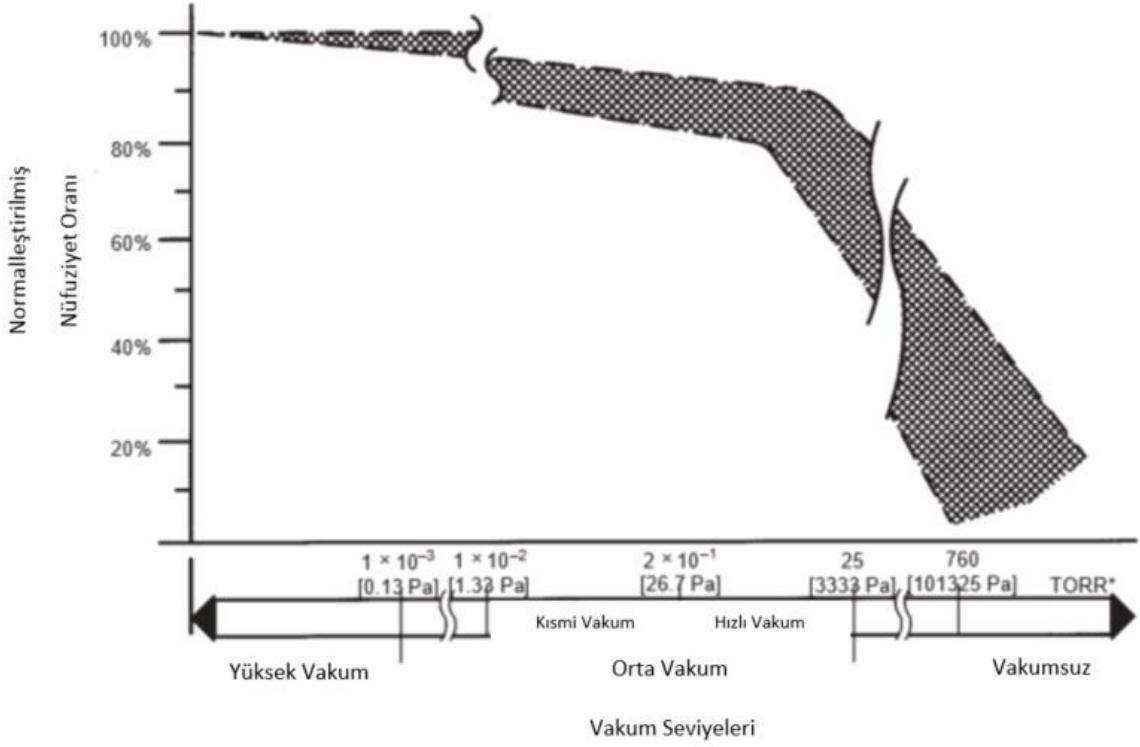
- VI. Elektron ışın kaynak sistemi ile beraber gelen ve elektron ışınından dolayı oluşan X ışınlarına karşı koruma sağlayan cihaz koruyucusunun belirli aralıklarla kontrol edilmesi gerekmektedir. Bunun yanında çalışan personel sağlığı açısından risk teşkil eden bu durumdan ötürü ortam koşullarında kontrol altında tutulması ve izlenmesi büyük önem arz etmektedir.
- VII. Elektron ışın kaynağı, farklı malzemelerin kaynatılmasına olanak sağlamasına rağmen; elektron ışınının cihaz içerisinde manyetik alan ile saptırılmasından dolayı, manyetik alan ile birlikte kaynak arayüzünde elektromotor kuvveti oluşturabilecek parçaların kaynatılması zor olacaktır. Buna ek olarak, ferromanyetik malzemeler, manyetik ortam nötrleştirilmeden, kaynatılmamalıdır. Kaynak yapılacak malzemelerin oturtulacağı fikstür malzemesinin manyetik olmaması gerekmektedir.
- VIII. Kaynak arayüzünde dar bölgede yüksek yoğunluklu güç sağlayan kaynak yöntemlerinin genel bir problemi olduğu gibi; elektron ışın kaynağında da, kaynak sürekliliği olmadığı takdirde kaynak kökü gözenekleri ortaya çıkmaktadır. Bu durum kısmı nüfuziyetli kaynaklarda genellikle karşılaşılmaktadır. Tam nüfuziyetli kaynak için bu durum söz konusu değildir.

Günümüzde elektron ışın kaynağı ile ilgili çalışmalardan ve teknolojiyen bahsederken, çoğu çalışmanın vakum altında yapıldığı belirtilmektedir. Vakum odalı tezgahların bulunduğu gibi, vakumsuz olan elektron ışın kaynağı tezgahları da mevcuttur. Bu bağlamda elektron ışın kaynağı kapsamında vakum seviyesine göre 3 tip kaynak yönteminden bahsetmek mümkündür. Her 3 tip yöntemde de elektron tabancası yüksek vakum [$\sim 10^{-7}$ torr] altındadır. Bu 3 tip vakum değerinin farklılaştığı kısım, kaynak yapılan malzemenin bulunduğu vakum odasıdır. Vakum odası vakum değeri 10^{-3} ile 10^{-6} torr aralığında olanlar yüksek vakumlu; 1.0×10^{-1} ile 1.0×10^{-3} torr aralığında olanlar orta vakumlu ve vakumsuz elektron ışın kaynağı olarak adlandırılmaktadır. Vakumsuz elektron ışın kaynak yönteminde malzeme atmosferik ortamda veya koruyucu gaz altında kaynak yapılmaktadır. Yüksek vakumlu elektron ışın kaynak yönteminde, vakum odasının uygun vakum değerine gelmesi gerekmektedir. Bu durum vakumsuz kaynak yönteminde söz konusu değildir. Paslanmaz çelik ve alaşımları ile kaynak yapılırken kaynak döngü

süresinden kazanmak adına vakumsuz tezgahlar kullanılabilirken; titanyum ve alaşımları için atmosferik ortamlar, kaynak kalitesini ısı girdisiyle birlikte oksitlenme ve hidrojen gevrekleşmesi açısından bozacağından; vakumsuz kaynak yerine yüksek vakumlu kaynak tipi tercih edilmektedir. Şekil 1.5'te vakum tiplerine göre elektron ışın kaynağı sınıflandırması bulunmaktadır. Elektron ışın kaynak yöntemi ile yapılan kaynak operasyonlarında nüfuziyet miktarı, atmosferik koşullara yaklaştıkça azalmaktadır. Bunun en büyük sebeplerinden birisi GTWD'nin azalmasıdır. Çünkü elektron ışınlarının yayıldığı ortam atmosferik ortam koşullarına yakınsadıkça, ışın dağılım göstermektedir ve bu durum kaynak kabiliyetlerini ve kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Şekil 1.6'da atmosferik ortam koşullarına yaklaştıkça, kaynak nüfuziyet miktarının azaldığı vakum tipleri bazında karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir [1].



Şekil 1.5 Elektron ışın kaynağı vakum odası, vakum miktarına göre sınıflandırılması [1]



Şekil 1.6 Kaynak nüfuziyet miktarı ve vakum seviyesi ilişkisi [1]

1.2. Elektron Işın Kaynağı Yöntemi Proses Değişkenleri

EBW, birincil dereceden ayarlanabilir/kontrol edilebilen kaynak parametreleri; ışın gerilimi, ışın akımı, kaynak hızı ve ışın odaklama bobini akımından oluşmaktadır. İkincil dereceden ayarlanabilir/kontrol edilebilen değişkenler ise kaynak bölgesi vakum seviyesi, GTWD ve elektron ışın salınımından oluşmaktadır. Daha önce de belirtildiği üzere enerji dönüşümü verimliliği açısından elektron ışın kaynağı; diğer elektrik arkı ve lazer kaynak yöntemleri açısından daha yüksektir. Yani EBW'in sağladığı daha düşük bir enerji girdisi ile, daha yüksek enerji girdisi sağlayan geleneksel ark ve lazer ışın kaynak işlemleri ile eşdeğer kaynak nüfuziyet değerleri sağlanmaktadır. Bunun yanında kaynak yapılacak malzeme, malzemenin kaynak öncesi temizlenme yöntemi ve prosedürü, kaynak yapılacak malzeme yüzeylerinin hazırlanması, kaynak birleşme yüzeyi geçme miktarı (sıkı geçme, tatlı sıkı geçme, gevşek geçme, vs.), kaynak yapılacak yüzey ile kaynak ışını arasındaki açı, fikstürleme, vb. parametreler çoğunlukla kaynak öncesi ayarlanan, karar verilen ve sabit olarak tutulan değişkenler olarak tanımlanmaktadır. Diğer tüm konvansiyonel kaynak işlemlerinde olduğu gibi, bu işlem parametrelerindeki herhangi küçük değişiklikler, kaynak bölgesinde, kaynak formunda ve kaynak

nüfuziyet değerlerinde büyük sapmalara yol açabilmektedir. Bu nedenlerden ötürü kaynak öncesi prosesin kontrol edilmesi, kaynak sürekliliği yani tekrarlanabilirlik açısından büyük önem arz etmektedir. Elektron ışın kaynak yönteminin en güçlü yanlarından biri kaynak bölgesinde yüksek güç yoğunluğu olmasına rağmen; yukarıda bahsi geçen nedenlerden ötürü kaynak bölgesi geometrisinin ve kaynak prosesinin tekrarlanabilir olması, elde edilecek ürünün kaynak performansı açısından büyük bir öneme sahiptir.

Bu nedenle, makineden makineye ya da zaman içinde aynı kaynak makinesinde, ışın akımı, voltajı, kaynak hızı ve ışın odaklama bobini akımı sabit tutulsa dahi kaynak bölgesinde yukarıda bahsi geçen etkenlerden ötürü güç yoğunluğu farklılıkları oluşacağından, kaynak nüfuziyetinde varyasyonlar meydana gelebilmektedir [1].

Sonuç olarak; kaynak performansının önemli olduğu kritik uygulamalarda (basıncı sistemler gibi), EBW proses tekrarlanabilirliği için yukarıda belirtilen ve ürüne özel her uygulama tekrarında kontrol altında tutulması gereken parametrelerin yanı sıra, EBW filaman değişiminin (Genellikle filaman çalışma süresi saat bazında üretici firma tarafından belirtilmektedir.), vakum haznesinin, vakum elemanlarının (conta vs.) periyodik olarak kontrol altında tutulması büyük önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında belirtildiği üzere, basıncı bir sistem gibi kritik uygulamalarda yukarıda bahsi geçen kontrollerle beraber; her bir ürün grubu kaynağından önce; şahit numune kaynatılmaktadır. Yüzey kaynak kalite kontrolü için sıvı penetrasyon muayenesi yapılmaktadır. Şahit numunesinden alınacak olan parça dilimleri X-Ray muayenesine sokulmaktadır. Böylece kaynak nüfuziyet miktarı kontrol altında tutulabilmektedir.

Proses kontrol altına aldıktan sonra ana (birincil dereceden ayarlanabilir) kontrol edilebilir EBW proses parametreleri değerlendirildiğinde, elektron ışın kaynak yöntemi programlanabilir olduğundan, diğer konvansiyonel ark kaynak yöntemlerine göre daha fazla ve farklı parametrelerin kontrolüne olanak tanımaktadır. Kontrol edilebilen kaynak parametre çeşitliliği, EBW kaynak yönteminin farklı uygulamalarda kullanılmasına zemin sağlamaktadır [1].

Bu bölümde majör ve minör EBW proses parametreleri incelenecektir. Majör parametreler, birincil dereceden ayarlanabilir/kontrol edilebilir olarak da adlandırılırken; minör parametreler ikincil dereceden ayarlanabilir / kontrol edilebilir olarak adlandırılmaktadır. İkincil dereceden ayarlanabilir / kontrol edilebilir minör

parametreler kaynak nüfuziyet miktarı ve kaynak performansı açısından yüksek derecede ağırlığa sahip değilken; bu parametrelerin değerlerinin EBW kaynak operasyonu boyunca ihtiyaç duyulması durumunda sabitlenip kullanılması, nihai kaynak yüzey kalitesi açısından büyük öneme sahiptir.

1.2.1. Elektron Işın Kaynağı Proses Parametreleri

Elektron ışın kaynağı temel parametreleri ve tanımları aşağıda belirtildiği gibidir [1]:

Işın gerilimi, birinci dereceden öneme sahip bir kaynak parametresidir. EBW kaynak tezgahı olarak genellikle endüstriyel uygulamalarda 30, 40, 60 ve 150 kV'luk elektron tabancalarına sahip makineler kullanılmaktadır. Seçilen ışın gerilim aralığı, elde edilen kaynak derinliği açısından büyük bir etkiye sahiptir. Işın gerilimi hassas bir şekilde kontrol edilmelidir; çünkü ışının gücü ve güç yoğunluğu uygulanan voltaj ile ilişkilidir. Işın gerilimindeki değişim, kaynak yapılacak yüzey üzerinde asgari odak noktası oluşturabilmesi için ışın odaklama bobin akımı üzerinde yüksek seviyede etkiye sahiptir. Işın odaklama bobin akımındaki bu değişim GTWD'yi de etkilemektedir. Mevcut elektron ışın tabancası teknolojisi ile voltaj değeri; belirlenen değer $\pm\%1$ marjında tutulabilmektedir.

Işın akımı, birinci dereceden öneme sahip bir diğer kaynak parametresidir. Işın akımı, kaynak yapılan parçaya sağlanan ısı girdisi yani güç girdisi ve güç yoğunluğu açısından büyük öneme sahipken; ışın akım değerindeki değişimler, asgari odak noktası oluşumunda, ışın gerilim değeri kadar büyük etkiye sahip değildir. Düşük ışın akım uygulamalarında ise ışın akım değerindeki ufak bir değişiklik, asgari ışın odak noktası elde etmek için ışın odaklama bobin akımında büyük etkiye sahiptir.

Işın akım artırım/azaltım açısı veya oranı, ışın akımının parametre olarak belirlenen değerine gelmesi için izleyeceği rejimi tanımlamaktadır. Işın akım artırım/azaltım değerleri zaman (s), açı ($^{\circ}$) veya oran ($^{\circ}/s$) cinsinden ifade edilebilir. Kaynak esnasında, örneğin yuvarlak kaynak arayüz kaynağında üst üste gelen kaynak bölgelerinde kaynak formunun başladığı bölgede yığıntı, topaklanmanın ve kaynak bitişinde ışın parça üzerinden çekilirken bölgesel olarak oluşabilecek çukurun engellenmesi açısından bu parametreler önem arz etmektedir. Bu parametrelerin kaynak bölgesi boyunca kontrolü, istenilen kaynak nüfuziyet miktarının ve kaynak havuz geometrisinin sağlanmasına imkan tanımaktadır.

Işın odaklama bobin akımı, ışın odak noktası üzerindeki etkisinden dolayı birinci dereceden öneme sahip olan bir diğer parametredir. Bu parametre, çalışma yüzeyinde, ışın boyutu, şekli ve güç yoğunluğu dağılımı üzerindeki etkisinden dolayı güç yoğunluğu üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Işın odaklama bobini akım değerini belirlemek için standart bir yöntem geliştirilmiştir. Işın odaklama bobin akımı, çalışma parçası üzerinde bulunan kaynak arayüzü ile aynı seviyede olan bölgeden alınan ışın çap değeri ile karşılaştırılarak kontrol edilmektedir. Aynı kontrolde kaynak yapılacak parçanın, elektron tabancasına olan mesafesi de kontrol altında tutulmaktadır. Yani kontrol edilen GTWD değeridir. Sabit odağa sahip elektron ışın tabancası kullanılmadığı durumlarda, ışın odaklama bobin akım değeri, ışın akım değerinden belirlenebilmektedir. Sabit odağa sahip elektron ışın tabancası kullanıldığı durumlarda; ışın odaklama bobin akımı değeri, düşük kaynak akım değerlerinde belirlenebilmektedir. Düşük ışın akım değerinin kullanılması, kaynak yüzeyinde bulunan ışın boyutunun daha belirgin olarak görülmesine olanak sağlamaktadır. Fiili odak noktasının yeri, ışın akım değerini değiştirdikçe yukarı ve aşağı şeklinde; yani elektron tabancasına doğru veya uzaklaşarak hareket etmektedir. Bu nedenle, düşük ışın akım değerlerinde kaynak yaparken hem ışın akım değerini, hem de ışın odaklama bobini akım değerini kontrol altında tutmak, kaynak performansı açısından büyük öneme sahiptir.

Kaynak hızı, herhangi konvansiyonel bir kaynak prosesinde olduğu gibi birinci dereceden ayarlanabilir ve önemli bir kaynak parametresidir. Bu parametre, kaynak dikişi boyunca birim uzunluk başına malzemeye güç girişini belirler ve kaynak nüfuziyet miktarında doğrudan etkiye sahiptir.

Işın salınımı; ışının salınım frekansı, genliği, şekli ve fazının bir sonucudur. Işın salınımı genellikle kaynak şeklini düzenlemek için kullanılmaktadır. Işın salınımının frekansı, kaynak şeklinin düzeltilmesinde, çoğu uygulamada yaklaşık %10'luk fark edilebilir bir etkiye sahiptir. Bu nedenle birinci dereceden öneme sahip bir parametre değildir. Işın salınımının şekli (dairesel, sinüs eğrisi, vs.) ise kaynak ve kaynak şekli üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Işın sapması, DC bir sinyal tarafından üretilen ve ışının, kaynak birleşme noktasına yakın bir yerde konumlandırılmasını sağlayan bir parametredir. Işının, normal tanımlanan rotasından açısal bir sapmaya neden olur. Işın sapması, parametre ayarlamalarında ve ince malzemelerin kaynağında kullanılabilir. Işın sapmasının kalın malzeme kaynağında kullanılmasına yönelik uygulamaya

pek rastlanılmamaktadır. Çünkü kalın malzeme kaynağında kullanılması, ışının normal rotasından sapmaya yol açtığı için; tamamlanamamış veya sürekliliği elde edilemeyen kaynak nüfuziyetine sebebiyet vermektedir.

Kaynak açısı, dairesel kaynak arayüzü boyunca elektron ışınının taradığı açı, kaynak açısı olarak tanımlanmaktadır.

1.3. Titanyum Malzeme Yapısı ve Titanyum Kaynak Yapılabilirliği

Titanyum alaşımları, uzay ve havacılık uygulamalarında yapısal malzeme olarak tercih edilmektedir. Tercih edilmesindeki en önemli ve ana etkenler malzemenin sağladığı yüksek mukavemet değeri, yüksek tokluk değeri ve üstün korozyon dayanımıdır.

Titanyum alaşımları kaynağı için çeşitli kaynak yöntemleri kullanılmasının yanı sıra en yaygın olarak tungsten ark kaynağı ve elektron ışın kaynağı kullanılmaktadır. Titanyum kaynağında, malzemenin yüzey temizliği ve malzemeye kaynak yapılan ortamın soy gaz ile koruma altına alınması veya kaynak yapılan ortamın vakum altında olması büyük önem arz etmektedir. Titanyum eriyik fazdayken; ortamda bulunan oksijen, azot ve hidrojen ile hızlıca tepkimeye girme eğilimindedir. Eriyik haldeki malzeme, kaynak yapılan ortamda bulunan bu gazlara maruz bırakıldığında, kaynak bölgesinin kirlenmesinden dolayı, kaynak bölgesinin mekanik performansı baz metal mekanik performans değerlerine göre olumsuz yönde etkilenmektedir. Bu sebeplerden ötürü, elektrik ark kaynağı ve toz altı ark kaynağı gibi gaz korumasının dahi olmadığı yöntemlerle titanyumun kaynak yapılabilmesi mümkün değildir.

Elektron ışın kaynak yöntemi, yüksek verimlilik, tekrar edilebilirlik ve kaynak ortamının nötralize edilmesi; yani vakum altında yapılabilmesine olanak tanınması açısından, titanyum alaşımları için tercih edilen bir kaynak yöntemi haline gelmiştir. Tek pasoda dar bir kaynak havuzuyla, çok derin nüfuziyetin elde edilebilmesi, malzemeye yüksek enerji yoğunluğu ve düşük ısı girdisi sağladığından, yüksek nüfuziyete rağmen ısıdan etkilenmiş bölgenin minimum düzeyde tutulması elektron ışın kaynağının titanyum malzeme kaynak yapılabilirliği açısından en önemli avantajlarından biridir.

Kaynak bölgesinin mikro yapısal olarak değişimi; kaynak yapılan ana malzemeye ve kaynak sırasında malzemenin kaynak bölgesinde karşılaştığı sıcaklık döngüsüne ve miktarına bağlıdır. Malzemenin ısı iletkenliği, kaynak bölgesi

maksimum sıcaklığı ve yüksek sıcaklıklara maruz kalma süresi, kaynak bölgesinin soğuma süresi, malzemenin kaynak bölgesi ve etrafında mikro yapısal olarak değişikliklere neden olmaktadır. Malzeme mikro yapısındaki değişme kaynak bölgesinde baz metalden farklı olduğu için çoğu kontrolsüz proseslerde bu durum malzeme mekanik performansında olumsuz etkiye sebebiyet vermektedir [18].

Titanyum, kaynak prosesinin yanı sıra, üretim proseslerinin her aşamasında dikkat edilmesi gereken bir malzemedir. Titanyum ve alaşımları, farklı ve yüksek spesifik mukavemet değerlerine sahiptirler ve bu durum endüstriyel uygulamalar için sıkça kabul görmesinde ve kullanılmasında büyük öneme sahiptir. Daha önce de belirtildiği üzere mekanik performans açısından önem arz eden malzeme özelliklerinin bir araya gelmesi, havacılık ve uzay sanayi ile savunma sanayinde, elektron ışın kaynağının kullanılmasını daha etkin hale getirmektedir. Bu özelliklerden bazıları, yüksek spesifik mukavemet değeri, yüksek yorulma ömrü, tokluk değeri, korozyon dayanımı ve düşük yoğunluğu gibi malzeme özellikleridir. Titanyumun iki ana allotropik fazı bulunmaktadır: α fazı ve β fazı. HCP; α yapısı 882 °C'ye kadar kararlıdır ve bu sıcaklık değerinden sonra BCC; β yapısına dönüşmektedir. Bu dönüşüm gerçekleşirken, alaşımlama esnasında faz değişikliği sırasında; α , α - β , β alaşımları elde edilebilmektedir.

Ti-6Al-4V, α - β titanyum alaşımıdır ve üretilebilirlik, yüksek mukavemet değeri açısından savunma sanayii ve havacılık endüstrisi için vazgeçilmez bir malzemedir [19]. Ti-6Al-4V, α yapısı açısından %6 Alüminyum, β yapısı açısından %4 Vanadyum içermektedir. α - β alaşımı olması, bu malzeme için termo-mekanik işlemler yani mikro yapısal değişiklikler uygulandığında, çeşitli mekanik ve fiziksel özelliklerde malzeme performansı elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Ti-6Al-4V için malzemeye nüfuz eden oksijen ve azot yoğunluğu arttıkça; yüksek mukavemet değerlerinin yanı sıra düşük süneklik ve tokluk değeri elde edilirken; bu içeriklerin azaltılması ile daha iyi süneklik değeri, daha yüksek kırılma tokluk değeri, daha yüksek gerilmeye dayalı korozyon dayanımı ve çatlak büyümesi / ilerlemesine karşı daha yüksek dayanım elde edilmektedir [19], [20].

550 °C ve üzerinde, titanyum malzemenin eriyik hali, atmosferde bulunan ve gevrekleşmeye sebep olan oksijen, hidrojen, azot ve karbona karşı aşırı derecede hassastır. Bu durum titanyum kaynağını zorlaştırmaktadır. Kaynak öncesi ve kaynak işlemi esnasında kaynak yüzeyinin düzgün bir şekilde temizlenmemesi, dolgu malzemesinin uygun olmaması, kaynak esnasında kaynak bölgesinin uygun

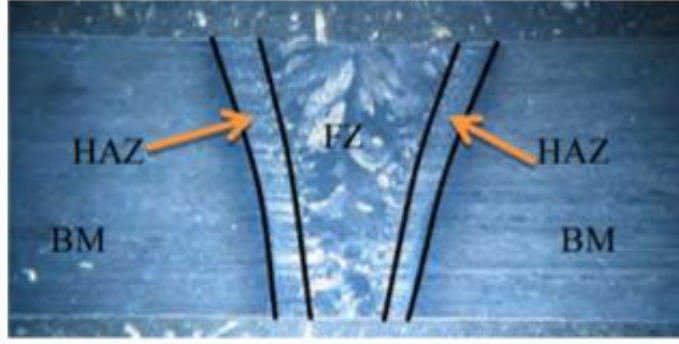
bir koruyucu gaz ile korunmaması ve/veya kaynak ortamının atmosfer gazlarından izole hale getirilmemiş olması kaynak bölgesinde kirliliğe neden olmaktadır. [19], [21].

Titanyum alaşımları geleneksel kaynak yöntemleri ile birleştirilebilir; fakat kaynak öncesinde ve esnasında, kaynak birleşme, ısıdan etkilenmiş bölge ve kaynak kökünde, malzemenin yüksek sıcaklıklardaki kimyasal aktifliğinden dolayı, özel önlemlerin alınması ve kirliliğin önlenmesi gerekmektedir. Füzyon kaynak yöntemleri ile titanyum kaynağı, temelde yüksek yoğunlukta koruyucu soygaz içeren bir ortamda ve yüksek enerjili ışın ile yapılabilmektedir. EBW ise yüksek vakum altında bir hazne içerisinde yapılabildiğinden, yüksek sıcaklıktaki eriyik malzemeyi ve ısının etkisi altındaki bölgeyi gaz kirliliğinden koruduğu için, titanyum kaynağı için en uygun kaynak yöntemlerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Bunun yanı sıra, EBW diğer ark kaynak yöntemlerine göre düşük ısı girdisi, yüksek enerji yoğunluğu ve sağladığı yüksek nüfuziyet/kaynak genişliği oranı değerlendirildiğinde önemli üstünlüklere de sahiptir. [19], [22].

Jinkeun Oh ve arkadaşları [23], Ti-6Al-4V kaynak bölgesinin mikroyapısal karakteristiklerini ve mekanik gerilme özelliklerini incelemişlerdir. Kaynak bağlantı bölgesinin, ana malzemedan daha yüksek gerilme dayanımı gösterdiğini ve bunun temel nedeninin kaynak bölgesinde oluşan martensitik yapıdan kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Bunun yanında Sandeep Thakare ve arkadaşları [24], çekme testleri için hazırladıkları çekme kuponlarını, Ti-6Al-4V malzemesi için EBW yöntemini kullanarak hazırlamışlardır.

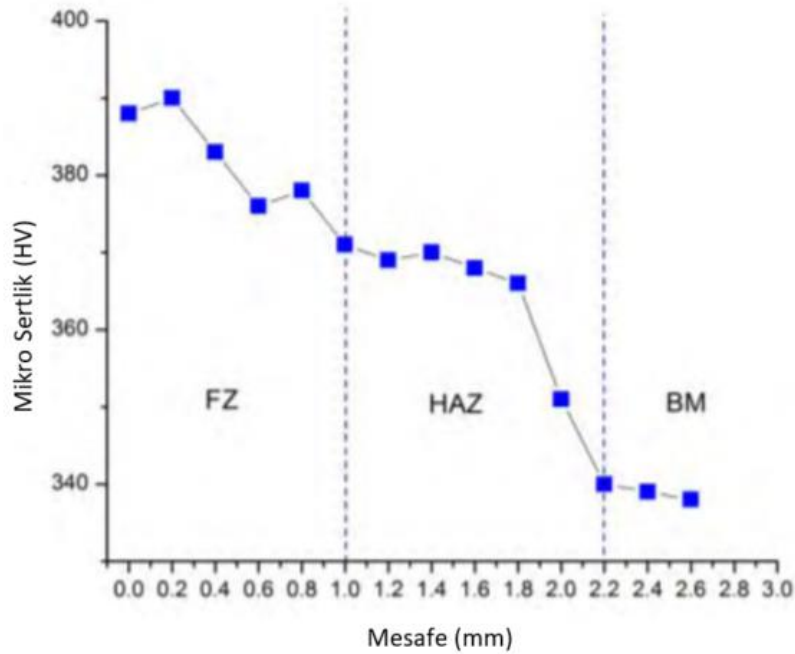
Şekil 1.7'de elektron ışın kaynak yöntemi ile birleştirilmiş Ti-6Al-4V malzemesinin kaynak kesit görüntüsü ve kesit üzeri bölge tanımlamaları gösterilmiştir [24]. Kuponlarda, ana malzeme, kaynak birleşme bölgesi ve ısıdan etkilenmiş bölgeler olmak üzere 3 farklı bölge için mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda kaynak bölgesi yüzey sertlik değeri en çok elde edilirken bu değer ana malzemeye gittikçe azalma göstermektedir. Malzemenin kopma ve akma gerilimi değeri, kaynak bölgesinde en yüksek elde edilirken; en düşük kopma gerilimi ana malzemedan, en düşük akma gerilimi ısıdan etkilenmiş bölgede görülmüştür.



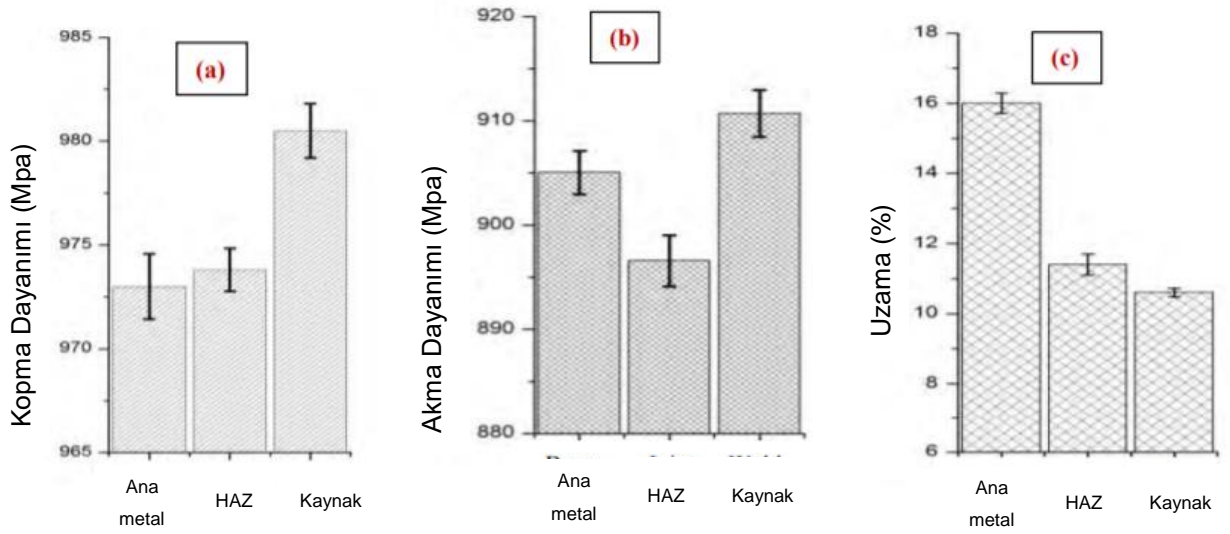
Şekil 1.7 Elektron ışın kaynağı yapılmış parçanın makro kesit görüntüsü ve kaynak bölge tanımlamaları [24]

Bunun yanında uzama miktarı yüzde olarak ana malzemeden kaynak bölgesine doğru gidildikçe azalış göstermektedir. Bu durum da kaynak bölgesinde malzemenin daha gevrek olduğunun göstergesidir. (Bkz. Şekil 1.8 ve Şekil 1.9.)

Bunun yanında çekme mukavemet değerleri kaynak birleşme bölgesinde, ana malzemeden daha yüksek olmasından dolayı yorulma dayanımları daha yüksektir. Fakat yorulma dayanımı söz konusu olduğunda malzeme yüzeyine yakın bozukluklar, kusurlar daha baskın olmaktadır [24].



Şekil 1.8 EBW ile kaynak yapılan malzemenin mikrosertlik değerinin kaynak birleşme noktasında, ısıdan etkilenmiş bölgede ve ana malzemede mesafeye bağlı olarak değişimi [24]



Şekil 1.9 Mukavemet değerlerinin ve uzama miktarının kaynak bölgesi ve etrafında gösterdiği karakteristik [24]

Jinkeun Oh ve arkadaşlarına göre [23], elektron ışın kaynağı ile kaynatılmış yüzeyde görülen mikro gözenekler, çatlak başlangıç ve ilerleme bölgeleri olarak değerlendirilmelidir. Çünkü bu bölgelerde yorulma mukavemeti azalmaktadır. Casavola ve arkadaşları [25] titanyum malzemesiyle alın kaynaklı bağlantıların yorulma davranışlarını çalışmışlardır ve bunun için yorulma testleri yapmışlardır. Bu çalışmada da yorulma hatalarının kaynak birleşme arayüzünden ziyade ana malzemeden olduğunu tespit etmişlerdir.

Bu tez çalışmasında EBW parametrelerini belirlemek, elde edilen en optimum parametreler ile mekanik açıdan en yüksek performansı elde etmek için Şekil 1.10 ve Şekil 1.11'de kimyasal özellikleri ve mekanik detayları verilen Ø60 ve Ø70 mm'lik ASTM B348-13'e uygun çubuklar kullanılmıştır. EBW parametreleri belirlenirken; malzeme mekanik özelliklerinin ve kimyasal bileşenlerinin yanı sıra geliştirilen basınçlı tüp kaynak arayüzü et kalınlığından dolayı, bu tez çalışmasında 0 ile 2,5 mm nüfuziyet aralığı incelenmiştir. Kaynak nüfuziyet miktarına ilaveten kaynak havuz genişliği de elde edilen nihai parametre seti değerlendirmesinde dikkate alınmıştır.

1.3.1. Titanyum Kaynak Öncesi Yüzey Temizliği

Titanyum malzeme yapısı gereği, oda koşullarında ya da kontrollü ortamda olsa dahi dış yüzeyinde oksit tabakası oluşturarak alt katmanlarını korumaya almaktadır. Titanyum malzemenin ve/veya işlenmiş titanyum parçanın, kaynak

öncesi yüzeyinde bulunan bu tabakanın giderilmesi, kaynak işlemi ve sonrasında kaynak performansı açısından büyük önem arz etmektedir. Bu kapsamda uygulanabilecek farklı yöntemler bulunmaktadır [26].

Bu tez çalışmasında kullanılan yöntem ise; kaynak öncesi, talaşlı imalat sonrası, parçaların yüzeylerinde bulunan oksit tabakasının asit ile temizlenerek giderilmesi ve ardından parçaların durulanması yöntemidir.

Asitle temizleme işlemi için kullanılacak çözelti bilgisi Çizelge 1-2'de verilmektedir. Asitle temizlenen parçalar durulanır. Parçalar kaynak için kullanılmadan önce durulama suyunun klor içeriği ya da iletkenlik değeri Çizelge 1-3'e göre kontrol edilir ve parçalar kaynak işlemine alınır. Kaynak işleminden önce işlenmiş parçalar için, son durulama suyu maksimum klor seviyesi 10 ppm veya son durulama suyu iletkenlik değeri maksimum 20 μ S/cm olmalıdır. Diğer durumlarda ve döküm parçalar için maksimum klor seviyesi 50 ppm veya son durulama suyu iletkenlik değeri maksimum 100 μ S/cm olmalıdır.

Çizelge 1-2 Asitle Temizleme Çözeltisi İçerik Bilgisi

| Kimyasal Bileşen | İçerik | Kontrol Limit Değerleri | Sıcaklık | Zaman |
|------------------|---------------------------|-------------------------|------------------|------------|
| Nitrik Asit | %40 | %33-45 | Oda Sıcaklığında | 1-5 dakika |
| Hidroflorik Asit | %2 | %1.5-2.5 | | |
| Deiyonize Su | %100'e dengeleyecek kadar | - | | |
| Titanium | - | Max 30 g/l | | |

Çizelge 1-3 Son Durulama Suyunun Klor ve İletkenlik Değerleri


| Klor İçeriği / İletkenlik | Maksimum Klor | ya da | Maksimum İletkenlik |
|---------------------------|---------------|-------|---------------------|
| ASTM B600 - 11(2017) | 10 ppm | | 20 μ S/cm |
| | 50 ppm | | 100 μ S/cm |

BAOJI FIRST TITANIUM INDUSTRY CO.,LTD.

CERTIFICATES OF QUALITY According to EN10204/3.1+PED 2014/68/EU

NO: HP7245-T-7

DATE:Aug.03,2018

| | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------|-------------------------------------|---|--|------------|---|------------------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------|---------|
| Commodity : Titanium Round Bar Gr.5 Ti6Al4V | | | | | | | Finish: Annealed | | | | |
| Specification : Acc.to AMS 4928W, ASTM B348, ASME SB348, WL.3.7164, AMS6931, BSEN 4267:2001 | | | | | | | | | | | |
| Size | | | Quantity | | Net Weight | | Heat No. | | Lot No. | | |
| Dia60(k12:-0/+0.3) x L3000-3100mm | | | 13pcs | | 501.40kgs | | 180510-52 | | 180510-52 | | |
| Chemical Composition (wt.%) | | | | | | | | | | | |
| Requirement | Fe max | C max | N max | H max | O max | Y max | Al | V | Residuals Each(max) | Residuals Total(max) | Ti |
| AMS 4928 | 0.30 | 0.08 | 0.05 | 0.0125 | 0.20 | 0.005 | 5.5-6.75 | 3.5-4.5 | 0.10 | 0.40 | Balance |
| ASTM B348 | 0.40 | 0.08 | 0.05 | 0.015 | 0.20 | / | 5.5-6.75 | 3.5-4.5 | | | |
| AMS 6931 | 0.30 | 0.08 | 0.05 | 0.015 | 0.20 | 0.005 | 5.5-6.75 | 3.5-4.5 | | | |
| WL3.7164 | 0.30 | 0.08 | 0.05 | 0.015 | 0.20 | / | 5.5-6.75 | 3.5-4.5 | | | |
| Result | 0.16 | 0.012 | 0.009 | <0.0006 | 0.16 | <0.005 | 6.07 | 4.20 | <0.10 | <0.40 | Balance |
| Tensile Test | | | | | | | | | | | |
| Requirement | Tensile Strength (MPa) min | | Yield Strength,0.2% Offset (MPa) min | | | Elongation in 4D (%) min | | Reduction of Area min. % | | | |
| AMS 4928 | 896 | | 827 | | | 10 | | 25 | | | |
| ASTM B348 | 895 | | 828 | | | 10 | | 25 | | | |
| AMS 6931 | 896 | | 827 | | | 10 | | 25 | | | |
| WL3.7164 | 900 | | 830 | | | 10 | | 25 | | | |
| Result | 973 | | 910 | | | 18 | | 40 | | | |
| Other Test | | | | | | | | | | | |
| Dimensional Inspection | Visual Inspection | Surface Contamination Inspection | | Ultrasonic Inspection Acc to AMS 2631D CL. A1 | | Hardness Test(HRC) | Microstructure Inspection | Macrostructure Inspection | | | |
| Acceptable | Acceptable | Acceptable | | Acceptable | | 33 | Acceptable | Acceptable | | | |
| We hereby certify that the materials described above has been tested/inspected and conform to complies with the terms as per purchase requirements of Order No. HP7245 Date Jun.19,2018 confirmation inspection and dimensional control without complaints. | | | | | | | | | | | |
| Note : Beta transform temperature 980-990℃ | | | | | | | | | | | |
| Manufacturer of starting material for the finished product , melting and refining practice : Baoji First Titanium Industry Co., Ltd. | | | | | | | | | | | |
| Melting Method : Double VAR . Heat treatment : 750℃/90min , air cooling . | | | | | | | | | | | |
|  | | | | | | <p>MANAGER OF QUALITY DEPARTMENT BAOJI FIRST TITANIUM INDUSTRY CO.,LTD.</p> | | | | | |


Şekil 1.10 Ø60 mm'lik Ti 6Al-4V çubuğun kimyasal ve mekanik özellikleri

BAOJI FIRST TITANIUM INDUSTRY CO.,LTD.

CERTIFICATES OF QUALITY According to EN10204/3.1+PED 2014/68/EU

NO: HP7245-T-8

DATE:Aug.03,2018

| | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------|-------------------------------------|---|----------|----------|--|------------------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------|---------|
| Commodity : Titanium Round Bar Gr.5 Ti6Al4V | | | | | | | | | Finish: Annealed | | |
| Specification : Acc.to AMS 4928W, ASTM B348,ASME SB348,WL.3.7164,AMS6931,BSEN 4267:2001 | | | | | | | | | | | |
| Size | | | | Quantity | | Net Weight | | Heat No. | | Lot No. | |
| Dia70(k12:-0/+0.3) x L3000-3100mm | | | | 6pcs | | 317.80kgs | | 180522-64 | | 180522-64 | |
| Chemical Composition (wt.%) | | | | | | | | | | | |
| Requirement | Fe max | C max | N max | H max | O max | Y max | Al | V | Residuals Each(max) | Residuals Total(max) | Ti |
| AMS 4928 | 0.30 | 0.08 | 0.05 | 0.0125 | 0.20 | 0.005 | 5.5-6.75 | 3.5-4.5 | 0.10 | 0.40 | Balance |
| ASTM B348 | 0.40 | 0.08 | 0.05 | 0.015 | 0.20 | / | 5.5-6.75 | 3.5-4.5 | | | |
| AMS 6931 | 0.30 | 0.08 | 0.05 | 0.015 | 0.20 | 0.005 | 5.5-6.75 | 3.5-4.5 | | | |
| WL3.7164 | 0.30 | 0.08 | 0.05 | 0.015 | 0.20 | / | 5.5-6.75 | 3.5-4.5 | | | |
| Result | 0.18 | 0.009 | 0.008 | 0.0006 | 0.189 | <0.005 | 6.16 | 4.28 | <0.10 | <0.40 | Balance |
| Tensile Test | | | | | | | | | | | |
| Requirement | Tensile Strength (MPa) min | | Yield Strength,0.2% Offset (MPa) min | | | Elongation in 4D (%) min | | Reduction of Area min.% | | | |
| AMS 4928 | 896 | | 827 | | | 10 | | 25 | | | |
| ASTM B348 | 895 | | 828 | | | 10 | | 25 | | | |
| AMS 6931 | 896 | | 827 | | | 10 | | 25 | | | |
| WL3.7164 | 900 | | 830 | | | 10 | | 25 | | | |
| Result | 974 | | 881 | | | 19.5 | | 47 | | | |
| Other Test | | | | | | | | | | | |
| Dimensional Inspection | Visual Inspection | Surface Contamination Inspection | Ultrasonic Inspection Acc to AMS 2631D CL. A | | | Hardness Test(HRC) | Microstructure Inspection | Macrostructure Inspection | | | |
| Acceptable | Acceptable | Acceptable | Acceptable | | | 33 | Acceptable | Acceptable | | | |
| <p>We hereby certify that the materials described above has been tested/inspected and conform to complies with the terms as per purchase requirements of Order No. HP7245 Date Jun.19,2018 confirmation inspection and dimensional control without complaints.</p> <p>Note : Beta transform temperature 985-995 °C</p> <p>Manufacturer of starting material for the finished product , melting and refining practice : Baoji First Titanium Industry Co., Ltd.</p> <p>Melting Method : Double VAR . Heat treatment : 750 °C/90min , air cooling .</p> | | | | | | | | | | | |
|  | | | | | | <p>MANAGER OF QUALITY DEPARTMENT</p> <p>BAOJI FIRST TITANIUM INDUSTRY CO.,LTD.</p> | | | | | |

Şekil 1.11 Ø70 mm'lik Ti 6Al-4V çubuğun kimyasal ve mekanik özellikleri

2. BASINÇLI TÜP SİSTEMLERİ

Bu bölümde, basınçlı sistemlerde sıkça karşılaşılan temel basınçlı tüp geometrileri ve analitik hesaplamalarından bahsedilmektedir. Bu bölümde bahsi geçecek hesaplamalarda, ortam atmosferik olarak değerlendirildiğinden, dış basınç etkisinin, patlama basınç değeri üzerindeki etkisi yok denecek kadar az olacağından, çıkarılmıştır. Bahsi geçen denklemler, hacmi, yani geometrik kısıtlamaları (çap, et kalınlığı vb.) bilinen basınçlı sistemler için patlama basınç değerini hesaplamada kullanılmak üzere çıkarılmıştır.

2.1. Küresel Basınçlı Sistemler

Küresel basınçlı sistemler, İçerisinde depolanacak gaz miktarı belli olan durumda, tasarlanabilecek en hafif basınçlı sistemlerden biridir. Fakat bazı durumlarda, mekanik paketleme açısından küresel şekil yapısı itibarı ile kapladığı alan çok fazladır.

2.1.1. Mukavemet Analizi- İnce Cidarlı Küresel Tüp

İnce cidarlı küresel basınçlı tüplerde oluşan ana gerilmeler:

Çevresel gerilmeler:

$$\sigma_1 = \frac{p_b D}{4t}$$

$$\sigma_2 = \frac{p_b D}{4t}$$

Radyal gerilme:

$$\sigma_3 = -p_b$$

olarak hesaplanabilmektedir. Burada p_b , patlama basınç değerini; D , ortalama çap değerini ve t ise malzeme et kalınlık değerini belirtmektedir.

Küresel basınçlı tüpün patlama basınç değerindeki Von Mises gerilim değeri hesaba katıldığını düşünürsek; kabul edilebilir maksimum gerilim değeri, patlama basınç değerinde elde edilmektedir. Bu bağlamda Von Mises gerilimleri aşağıda belirtildiği gibi elde edilebilir:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$

$$\sigma_y = p_b \left(\frac{D}{4t} + 1 \right)$$

Küresel basınçlı tüpün iç ve dış çap değerleri sırasıyla aşağıda belirtildiği gibi elde edilebilmektedir:

$$D_i = D - t$$

$$D_o = D + t$$

D_i , iç çap değerini; D_o , dış çap değerini belirtmektedir.

Bu bağlamda Von Mises gerilim değerleri iç çap ve dış çap için de aşağıda belirtildiği gibi hesaplanabilmektedir:

$$\sigma_y = p_b \left(\frac{D_i}{4t} + \frac{5}{4} \right)$$

$$\sigma_y = p_b \left(\frac{D_o}{4t} + \frac{3}{4} \right)$$

2.2. Silindirik Basınçlı Sistemler

Silindirik basınçlı sistemler endüstride en çok kullanılan basınçlı sistemlerdir. Genellikle uç kısımları veya sonlandırılması, yarı elips, kubbe şeklinde tamamlanarak, silindirik düz kısım ile birlikte kapalı bir kap haline getirilmesi ile elde edilmektedir. Mekanik paketleme kısıtlamaları göz önünde bulundurulduğunda bu uç elips kısımlar, toplam silindir boyunu azaltabileceği için; bazı durumlarda ve bu tez çalışmasında olduğu gibi uç kısımlar düz ve silindir açıklık çapını kaplayacak şekilde de sonlandırılabilir.

2.2.1. Mukavemet Analizi- İnce Cidarlı Silindirik Tüp

İnce cidarlı silindirik basınçlı tüplerde oluşan ana gerilmeler:

Eksenel gerilme:

$$\sigma_1 = \frac{p_b D}{4t_c}$$

Çevresel gerilme:

$$\sigma_2 = \frac{p_b D}{2t_c}$$

Radyal gerilme:

$$\sigma_3 = -p_b$$

olarak hesaplanabilmektedir. Burada t_c , silindirik kısmın kalınlık değerini belirtmektedir.

Von Mises gerilim değeri:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$

$$\sigma_y = p_b \sqrt{3 \left(\frac{D}{4t_c} \right)^2 + 3 \frac{D}{4t_c} + 1}$$

Silindirik kısmın çevresel gerinim değeri:

$$\varepsilon_{2c} = \frac{1}{E} (\sigma_2 - \nu \sigma_1)$$

$$\varepsilon_{2c} = \frac{p_b D}{4t_c E} (2 - \nu)$$

olarak elde edilmektedir. Burada ε_{2c} , silindirik kısmın çevresel gerinim değerini; E, malzeme elastik modülünü; ν ise malzeme poisson oranını belirtmektedir.

Yarı küresel kısmın (silindirik kısmın sonlandığı bölge) eksenel ve çevresel gerinim değeri:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{p_b D}{4t_s}$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada t_s , yarı küre kısmın et kalınlığını belirtmektedir.

Yarı küresel kısmın çevresel gerinim değeri:

$$\varepsilon_{2s} = \frac{1}{E} (\sigma_2 - \nu \sigma_1)$$

$$\varepsilon_{2s} = \frac{p_b D}{4t_s E} (1 - \nu)$$

Burada ε_{2s} , yarı küresel kısmın çevresel gerinim değerini belirtmektedir.

Eğer hem silindirik; hem de yarı küresel kısmın gerinim değerlerinin eşit olduğu yani herhangi bir burulma, bükülme olmadığı varsayımını yaparsak ($\nu = 0$):

$$\varepsilon_{2c} = \varepsilon_{2s}$$

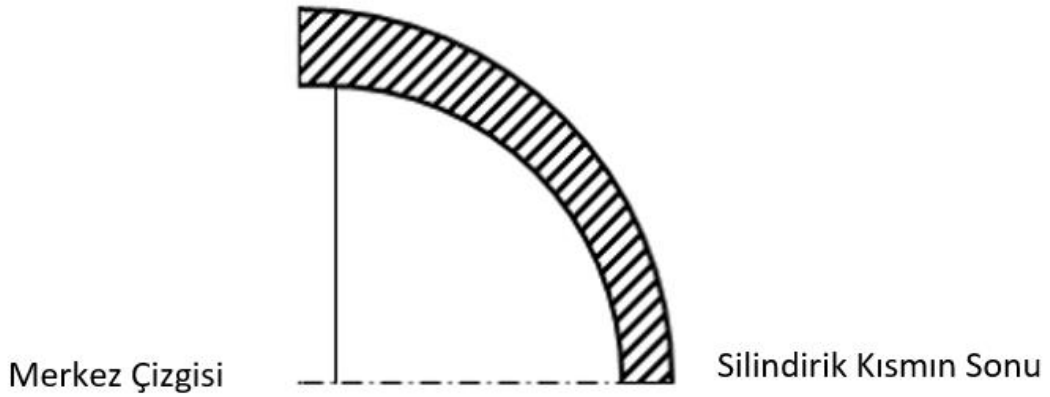
$$\frac{p_b D}{4t_c E} (2 - \nu) = \frac{p_b D}{4t_s E} (1 - \nu)$$

$$\frac{t_c}{t_s} = \frac{2 - \nu}{1 - \nu}$$

eşitliği elde edilmektedir.

Hem silindirik hem de yarı küresel kısımda gerilmelerin eşit olduğu durumda, silindirik bölümün et kalınlığının, yarı küresel bölümün et kalınlığının iki katı kadar olması gerekmektedir. Ancak silindir ile küresel bölümlerin birleşme noktalarında bozulma, burulma meydana geleceği için duvar kalınlığının aniden değişmesi yerine silindirik kısma doğru düzgün bir şekilde kalınlığın arttırılarak geçiş sağlanması gerekmektedir. Kalınlık artışının aniden olması birleşme noktasında eğilme momentine sebep olmaktadır. Bu nedenle Şekil 2.1'de görüldüğü gibi duvar

kalınlığının silindir kısma doğru düzgün ve homojen bir şekilde artış göstermesi bu etkiyi azaltmaktadır.



Şekil 2.1 Silindirik basınçlı tüp küresel uç bölgesi kalınlık geçişi

Eğilme momentinin azaltılmasına rağmen varlığı, düz boruya kıyasla, düz silindirik boru kısmında et kalınlığında artış gerektirmektedir. İnce kabuk analizi ile de ele alınabilecek bu artış, temel uygulamalardan edinilen bilgiye göre silindirik kısmın et kalınlığının yaklaşık %8'i kadar olmalıdır.

Son olarak silindirik basınçlı tüplerde, silindirik kısım boyu azaldıkça, basınçlı tüp için gereken toplam et kalınlığı da azalmaktadır. Aynı basınç performans gereksinimleri için silindirik kısım boyu sıfırlanıp, tüp geometrisi küre olduğunda; düz bir tüpün et kalınlığının yarısı kadar et kalınlığına ihtiyaç duyulmaktadır.

2.2.2. Mukavemet Analizi- Kalın Cidarlı Silindirik Tüp

Yukarıda mukavemet hesaplamalarında bahsedilen basınçlı tüp geometrileri için ince cidarlı basınçlı tüp varsayımı yapılmıştır. Bu bölümde ise silindirik tüp çapının, silindirik bölge et kalınlığına oranı 20'den az olan geometriler için kullanılan hesaplamalardan bahsedilmektedir. Çizelge 2-1'de ince ve kalın cidar varsayımı parametreleri ve gerilim denklemleri belirtilmiştir.

Çizelge 2-1 İnce ve Kalın Cidarlı Silindirik Geometrideki Tüpün Gerilim Hesaplamaları Karşılaştırmalı

| Parametre | İnce Cidarlı Silindirik Tüp Yaklaşımı | Kalın Cidarlı Silindirik Tüp Yaklaşımı |
|-----------|---------------------------------------|--|
| Dış Çap | $D_o = D + t$ | D_o |

| Parametre | İnce Cidarlı Silindirik Tüp Yaklaşımı | Kalın Cidarlı Silindirik Tüp Yaklaşımı |
|--------------------|---|--|
| İç Çap | $D_i = D - t$ | D_i |
| Ortalama Çap | D | $\frac{D_o + D_i}{2}$ |
| Et Kalınlığı | t | $\frac{D_o - D_i}{2}$ |
| İç Basınç | p | |
| Eksenel Gerilim | $\sigma_1 = \frac{pD}{4t}$ | $\sigma_1 = \frac{p}{2} \frac{D_o^2 + D_i^2}{D_o^2 - D_i^2}$ |
| Çevresel Gerilim | $\sigma_2 = \frac{pD}{2t}$ | $\sigma_2 = p \frac{D_o^2 + D_i^2}{D_o^2 - D_i^2}$ |
| Radyal Gerilim | $\sigma_3 = -p$ | |
| Von Mises Gerilimi | $\sigma_y = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$ | |

Kalın cidarlı silindirik tüp Von Mises gerilim değeri $p = p_b$ için:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$

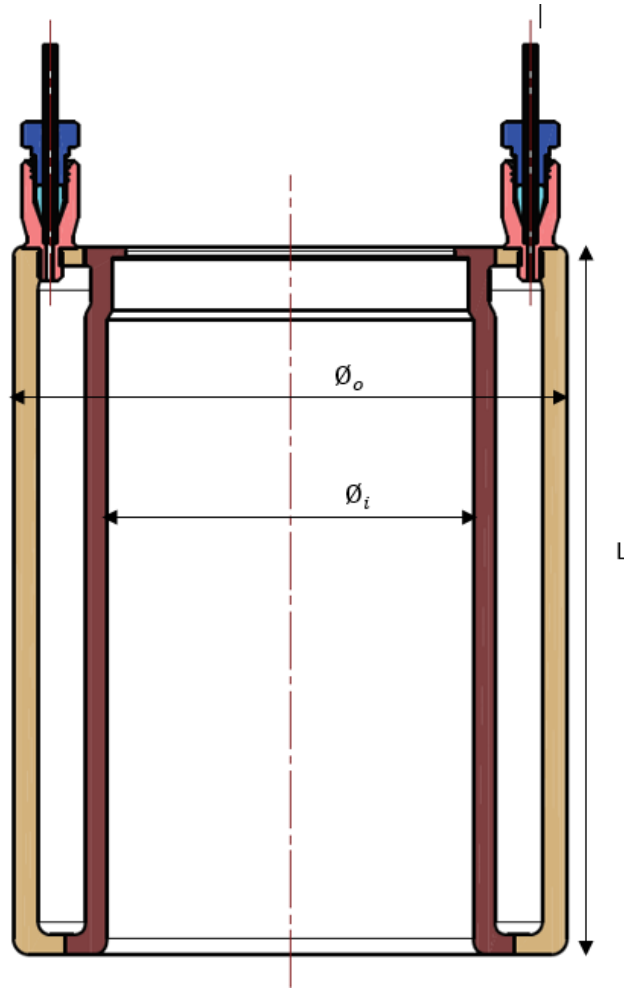
$$\sigma_y = \frac{1}{2} \frac{p_b}{D_o^2 - D_i^2} \sqrt{13D_o^4 - 2D_o^2 D_i^2 + D_i^4}$$

olarak elde edilmektedir [27].

3. BASINÇLI TÜP MEKANİK TASARIM GEREKSİNİMLERİ, ANALİTİK HESAPLAMALAR VE ARAYÜZ BİLGİLERİ

Bu tez çalışmasında bahsi geçen basınçlı tüpün kullanıldığı sistem mekanik paketleme kısıtlamalarından ötürü; Şekil 3.1'de belirtilen ana ölçülerden basınçlı tüp iç çap değeri 46 mm iken; basınçlı tüp dış çap değeri ise 69,5 mm olarak belirlenmiştir. İç ve dış çap malzeme cidar kalınlıkları belirlendikten sonra istenilen hacme göre, tüpün boyu (L) ayarlanabilmektedir. Tüp üzerinde 2 adet delik bulunmaktadır ve bu delikler, tüp gaz giriş ve çıkış arayüzü olarak adlandırılmaktadır. Tüp simetrik olduğu için giriş ve çıkış arayüzü tipi aynıdır. Şekil

3.2’de detaylı kesit görünümü belirtilen pnömatik arayüz bilgileri şu şekildedir: Tüp üzerinde dış silindirik parça üzerinde bulunan ve basınçlı tüp ile tüp pnömatik bağlantı rakoru mekanik bağlantısını sağlayan M3x0.5 diş arayüzü bulunmaktadır. Tüp üzerinde bulunan pnömatik bağlantı rakoru (pembe ile gösterilen kısım), dış silindirik parça üzerinde ve kendi arayüzünde bulunan dış bağlantısı ile tüpe bağlandıktan sonra yalnızca gaz sızdırmazlığı sağlamak amacıyla tüp ile pnömatik arayüz parçaları arasında lazer kaynak operasyonu uygulanmaktadır. Uygulanan kaynak parametreleri ve cihaz bilgisi Çizelge 3-1’de belirtildiği gibidir. Bu pnömatik arayüz VICI-Valco 1/16” bağlantı elemanlarına uygun olarak üretilmektedir. Bu bağlamda açık ve koyu mavi ile Şekil 3.2’de belirtilen parçalar 1/16” somun ve ferül VICI-Valco standard pnömatik bağlantı parçalarıdır. Arayüzde bulunan ve dış dünyaya açılan dış çap ölçüsü 1/16”, iç çap ölçüsü 1/32” olan standart boru kullanılmaktadır.

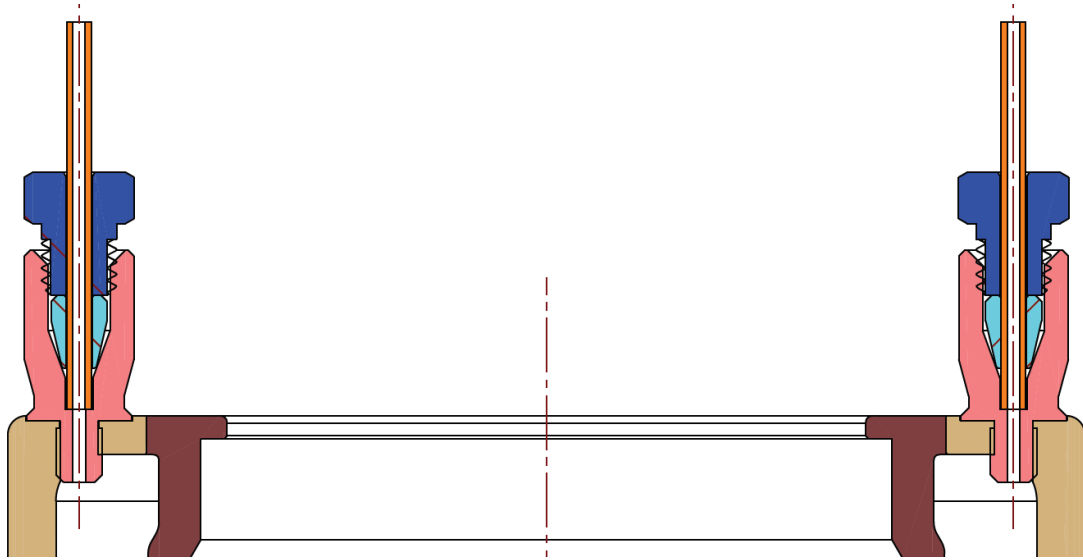


Şekil 3.1 Basınçlı tüp kesit görünümü ve ana ölçü tanımlamaları

Bunun yanında tüp dolum basıncı 500, patlama basıncı en az 900 bar'dır. MIL-STD-1522A standardına göre dolum basıncı 500 bar olan tüpün test basıncı 750 bar olmalıdır.

Çizelge 3-1 Basıncılı tüp – pnömatik arayüz lazer kaynağı

| | |
|-------------------------|-----------------------------|
| Kaynak Cihazı | SIGMA LASER P420-400 |
| Güç | %32 |
| Frekans | 13 Hz |
| Lazer Spot Çapı | 0.6 ± 0.1 |
| Darbe Süresi | 4 ms |
| Kaynak Teli Çapı | 0.4 mm |
| Kaynak İşlemi | 1 Paso telsiz, 1 paso telli |



Şekil 3.2 Basıncılı tüp üzeri pnömatik arayüzler kesit görünümü

Bu gereksinimler dikkate alındığında; iç silindirik tüp parçası için Çizelge 2-1'de belirtilen kalın cidarlı silindirik tüp yaklaşımı kullanılırken; dış silindirik tüp parçası için ince cidarlı silindirik tüp yaklaşımı kullanılmıştır. Et kalınlıkları sırasıyla 2.7 ve 3.1 mm olarak hesaplanmıştır. Tüpün her iki silindirik kısmı da en az 900 bar patlama basıncına dayandığı görülmektedir. (Bkz. Çizelge 3-2 ve Çizelge 3-3)

Burada dikkat çekilmesi gereken nokta, basınçlı tüp iç ve dış silindir cidar kalınlığı analitik hesaplamalarında, dış silindir için malzemenin UTS değeri dikkate alınırken; iç silindir için malzemenin YS değeri dikkate alınmış olup; et kalınlıkları

belirlenmiştir. İç silindir et kalınlığında güvenlik katsayısı bu yaklaşımla, dış silindirde yapılan hesaplama göre daha yüksek tutulmasına rağmen; testler sonucunda basınçlı tüpün patlama hata modunun içten olması beklenmektedir. Yapılan testler neticesinde karşılaşılabilecek patlama hata moduna göre bu durum tekrardan değerlendirilmiştir. Testler öncesinde her ne kadar et kalınlık değeri iç çapta bir miktar daha yüksek tutulsa da iç silindir çapta, cidara uygulanan basınç, iç silindir için vakum etkisi altındaymış gibi bir etki yaratacağından hata modunun basınçlı tüpün bu kısmında olacağı değerlendirilmektedir.

Çizelge 3-2 İnce Cidarlı Silindirik Tüp Yaklaşımı- Basınçlı Tüp Dış Silindirik Kısımı
Et Kalınlığı Hesaplaması

| | | |
|---|--------|-----|
| UTS (Ti Grade 5/ Ti- 6Al-4V) | 960 | MPa |
| Et Kalınlığı Formülasyonu (İnce Cidarlı Silindirik Yaklaşımı) | | |
| BP | 900 | bar |
| D _o | 0.0695 | m |
| t | 0.0031 | m |
| D _i | 0.0633 | m |
| Gerilim | 914 | MPa |

Çizelge 3-3 Kalın Cidarlı Silindirik Tüp Yaklaşımı- Basınçlı Tüp İç Silindirik Kısımı
Et Kalınlığı Hesaplaması

| | | |
|--|--------|-----|
| YS (Ti Grade 5/ Ti- 6Al-4V) | 880 | MPa |
| Et Kalınlığı Formülasyonu (Kalın Cidarlı Silindirik Yaklaşımı) | | |
| BP | 900 | bar |
| D _o | 0.0514 | m |
| t | 0.0027 | m |
| D _i | 0.046 | m |
| Gerilim | 784 | MPa |

4. TEST DÜZENEKLERİ

Bu tez çalışması süresince ve sonunda ortaya çıkan ürünün MIL-STD-1522A ve ASTM F2391-05 de belirtilen basınçlandırma ve sızdırmazlık testlerine uygun olarak test düzeneklerinin tasarlanması ve kurulması ihtiyacı doğmuştur. Sızdırmazlık test düzeneğinin yanında basınçlı tüpün basınçlandırılması için gaz dolum düzeneği de kurulmuştur. Bu bağlamda patlatma ve sızdırmazlık gereksinimlerinin karşılandığının test edebilmesi için kurulan test düzenekleri ve detayları aşağıda belirtildiği gibidir.

4.1. Patlatma Test Düzeneği

Bu bölümde basınçlı tüpün, patlama basıncı performansının test edilebilmesi için kullanılan patlatma düzeneği anlatılmaktadır.

Şekil 4.2'de diyagramı bulunan düzeneğin; Şekil 4.3'de fotoğrafı görülmektedir. Düzenekte, VN A ve VN B pnömatik vanalardır ve basınçlandırıcının manivelası motor yardımı ile çevrilmektedir. Tüm sistem elektronik olarak kontrol edilmekte ve veriler sensör yazılımı aracılığıyla alınmaktadır.

Patlatma düzeneğinde kullanılan pnömatik servo vanalar HIP marka Hippo 20-11LF4-MPO-NC model, basınç sensörü ESI Technology marka HP1002-2000DE model, veri toplama sistemi NI marka cDAQ-9178, CompactDAQ System NI 9207 8-ch (I) + 8-ch (V) combo modül, 24 bit, NI 9475 8-Ch 60 V, 1 us, High-Speed Sourcing Digital Output model ve basınçlandırıcı ise HIP marka 37-6-30 model numarasına sahip laboratuvar model standard basınçlandırıcıdır. Bu basınçlandırıcı manivelası sökülerek ucuna lineer bilyalı motor bağlanmış ve sistem elektronik kontrollü hale getirilmiştir.

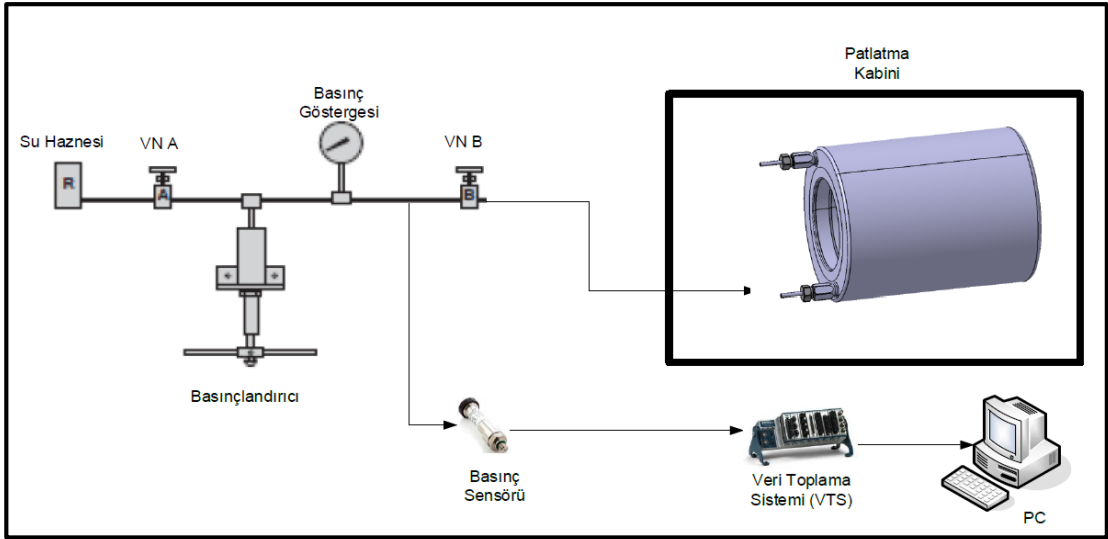
Basınçlı tüp test düzeneğine bağlanmadan önce üzerinde bulunan pnömatik arayüzlerindeki 1/16" lik hatlardan biri punta kaynak cihazı ile sonlandırılmaktadır. Punta kaynak operasyonunda kullanılan parametreler ve cihaz bilgisi Çizelge 4-1'de belirtildiği gibidir. Bir ucu punta kaynak ile sonlandırılmış 1/16" lik kılcal borunun fotoğrafı Şekil 4.1'de belirtildiği gibidir.



Şekil 4.1 1/16" lik kılcal borunun punta kaynağına ait görüntü

Çizelge 4-1 Basınçlı tüp pnömatik arayüz 1/16" kılcal boru punta kaynağı

| | |
|--|---------------------------------|
| Kaynak Cihazı | SİFF SP1 Masaüstü Punta Kaynağı |
| Kaynak Elektrotları Basma Süresi | 40 ms |
| Kaynak Çevrim Süresi | 35 ms |
| Kaynak Sonrası Elektrotların Bekleme Süresi | 5 ms |
| Kaynak Akımı | 20 kA |
| Darbe Adedi | 1 |
| Elektrotların Pnömatik Basınç Değeri | 3.8 bar |



Şekil 4.2 Su ile patlatma düzeneği diyagramı



Şekil 4.3 Su ile patlatma test düzeneği fotoğrafı

4.1.1. Patlatma Test Prosedürü

Su ile hidrolik patlatma düzeneğinin kullanım prosedürü aşağıda belirtildiği gibidir:

1. Basınçlandırıcının manivelası saat yönünde sonuna kadar çevrilir.
2. Patlatılacak numunenin içerisine şırınga ile daha önceden su enjekte edilerek, numune VN B ardına uygun pnömatik adaptörle bağlanır.
3. Numunenin üzerine patlatma kabini kapatılır ve kabin kulakçıkları vida ile sıkılır.
4. VN A açılır. Manivela saat yönünün tersine çevrilmeye başlanır ve sistem içerisine su girdiği gözlenir.
5. VN A kapatılır ve VN B açılır.
6. Manivela saat yönünde çevrilir, basınç artışı hem basınç sensöründen yazılımın takibi ile hem de basınç göstergesinden okunur. Patlama gerçekleşene kadar manivela çevrilmeye devam eder. Patlama basıncı basınç göstergesi üzerindeki basınç değerinin aniden 0 bar'a düşmeden önce ulaşılan basınç değeri olarak kayıt altına alınır.

4.2. Gaz Basınçlandırma Test Düzeneği

Bu bölümde basınçlı tüpün sızdırmazlık testi öncesi basınçlandırılması için kullanılan gaz basınçlandırma test düzeneği anlatılmaktadır.

Şekil 4.4'de gaz basınçlandırma test düzeneğinin diyagramı bulunmaktadır. Düzenek, gaz tankları, gaz basıncını arttırmak için booster (maksimum 800 bar), basınçlandırılan gazın depolanması için akümülatör (8 lt), basınçlı tüpe doldurulacak gazın basıncını ayarlamak için regülatör, basınç sensörleri, solenoid vanalar, manuel vana, basınçlı tüpü istenilen basınç değerinde basınçlandırdıktan sonra gaz hattını sonlandırmak için punta kaynak cihazı ve veri toplama sisteminden oluşmaktadır. Tüm sistem elektronik olarak kontrol edilmekte ve veriler sensör yazılımı aracılığıyla alınmaktadır. Gaz dolum işlemi tamamlandıktan sonra hat daha önceden Şekil 4.1'de belirtilen parametreler ile kaynak yapılarak sonlandırılmaktadır.

Gaz basınçlandırma düzeneğinde kullanılan gaz tanklarından GT01 sistemin basınçlandırılacağı gazdır. Diğer gaz tankı- GT02 içerisinde ise sızdırmazlık testinde basınçlı tüp içerisine basılması gereken He gazı bulunmaktadır. Bu sistemde kullanılan VTS ve punta kaynak cihazı yukarıda patlatma düzeneğinde belirtilen marka ve modelle aynı olmakla birlikte; booster HII marka ve 800 bar

basınca kadar çıkış verebilen model, akümülatör HIP marka R Series 8 lt model, solenoid vanalar Clark Cooper marka Ex 40 model, regülatör Pressure Tech marka LF692-01-S-500S-N-02N-N-NV model, basınç ve sıcaklık sensörleri ZETA/KELLER marka PA-33X / 1000bar / 80794 [233305.0053] model numarasına standard ekipmanlardan oluşmaktadır. Düzenek üzerinde bulunan arayüzler 1/4" dış çap x 0.109" iç çap boru bağlantılarına uygun olarak pnömatik bağlantı elemanları ve borulamalardan oluşmaktadır.

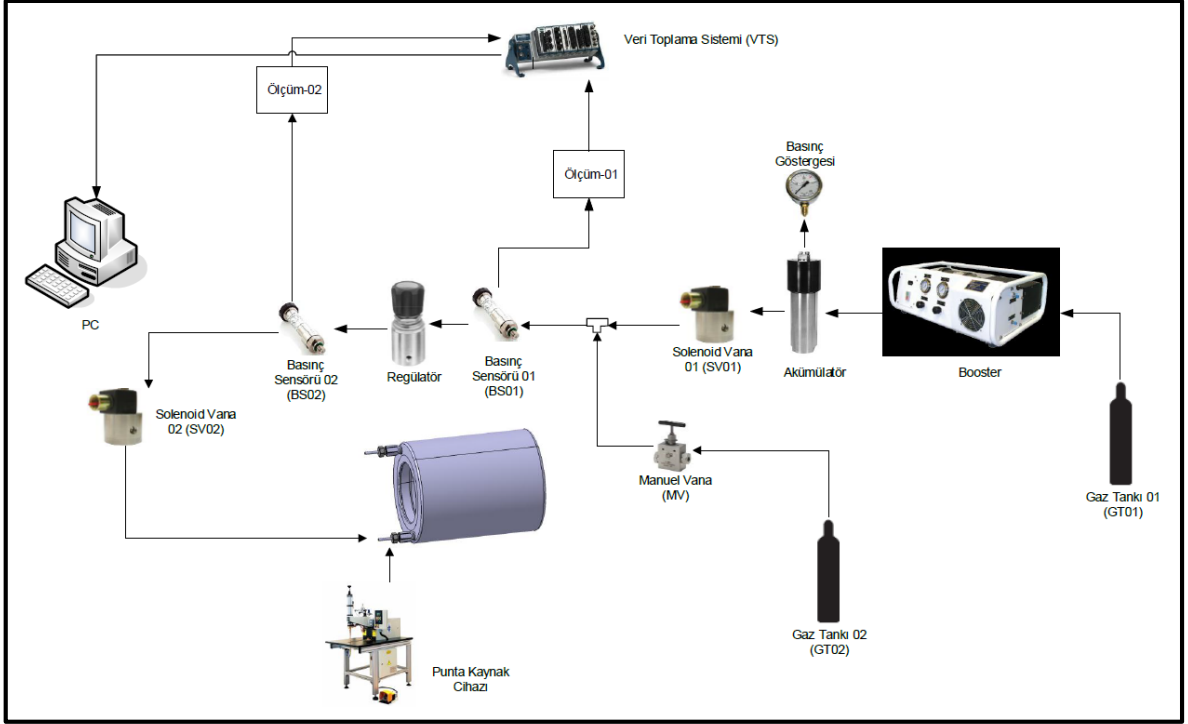
Gaz basınçlandırma test düzeneğine bağlı olan basınçlı tüpte; bir ucu punta kaynak ile sonlandırılmış 1/16" lik kılcal borunun, dolum hattına bağlı olan diğer basınçlı tüp çıkışındaki kılcal boru, tüp uygun basınç değerine geldiğinde punta kaynak ile sonlandırılarak tamamen sızdırmaz olması sağlanmaktadır.

4.2.1. Gaz Basınçlandırma Test Prosedürü

Gaz basınçlandırma düzeneğinin kullanım prosedürü aşağıda belirtildiği gibidir:

1. Bir kılcal tarafı punta kaynak ile sızdırmaz hale getirilmiş olan basınçlı tüp, dolum hattına SV 02 tarafından bağlanır.
2. Eğer basınçlı tüp içine He gazlı gaz karışımı basılacak ise; regülatör istenilen basınç seviyesine getirilerek GT02 içerisindeki gaz, basınçlı tüp içine önünde bulunan MV ve SV02 enerjilendirilerek basılır.
3. Eğer basınçlı tüp içine He gazlı gaz karışımı basılır ise; ısı denge sağlanana kadar yaklaşık olarak 45 dakika beklenir.
4. Basınçlı tüp içine He gazı basıldığı veya basılmadığı durumda; He GT tarafı MV ile kapatılarak; daha önce booster tarafından basınçlandırılan akümülatör önündeki SV 01 ve basınçlı tüpün bağlı olduğu SV 02 enerjilendirilerek; tüp içerisine doldurulacak dolum gazı regülatör çıkış basıncı dolum basıncında ayarlandıktan sonra doldurulur.
5. Isıl denge sağlanana kadar, yani tüp içi gaz sıcaklık değeri oda koşullarına geldiğinde kılcal hat punta kaynak ile körülenir ve sonlandırılır. Böylece tüp sızdırmaz hale getirilmektedir.

Gaz basınçlandırma, yani dolum işlemi boyunca basınç ve gaz sıcaklık değerleri regülatör giriş ve çıkışından kontrol edilmektedir.



Şekil 4.4 Gaz basınçlandırma test düzeneği akış diyagramı

4.3. Sızdırmazlık Test Düzeneği:

Sızdırmazlık testlerinde Pfeiffer ASM310 helyum kütle spektrometrelili kaçak detektörü kullanılmıştır. Bu test kapsamında basınçlı tüpü içerisine alacak bir adet AISI 316 SS malzemeden üretilmiş vakum haznesi, QF-25 vakum bağlantı elemanları kullanılmıştır. İçerisine Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’te belirtilen düzenekle; 100 bar helyum gazı ve 400 bar argon gazı basılan basınçlı tüp test prototipi de Şekil 4.5’te belirtilen vakum haznesine yerleştirilmiştir. Vakum haznesi ile ASM310 model helyum kütle spektrometrelili kaçak dedektörü arasında bir adet QF-25 bağlantı arayüzlerine uygun esnek vakum borusu kullanılmıştır.

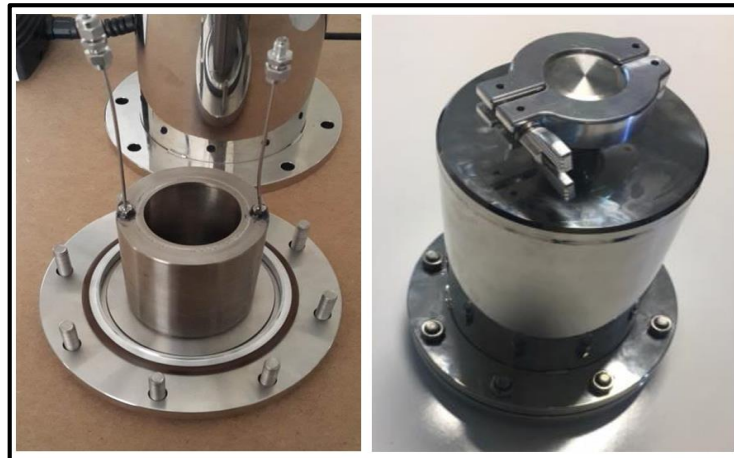
4.3.1. Sızdırmazlık Test Prosedürü

Sızdırmazlık düzeneğinin kullanım prosedürü aşağıda belirtildiği gibidir:

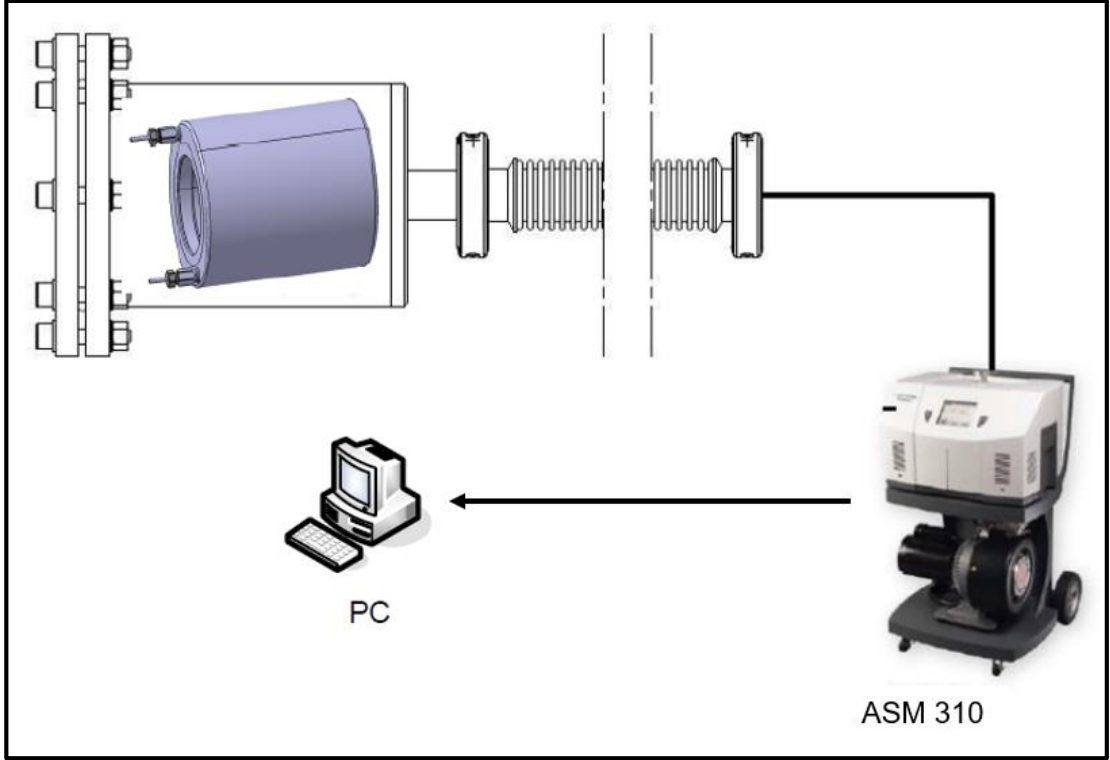
1. Bir kılcal tarafı punta kaynak ile sızdırmaz hale getirilmiş olan basınçlı tüp, dolun hattına SV 02 tarafından bağlanır.
2. Basınçlı tüp içerisine açık olan gaz çıkış noktasından, gaz basınçlandırma test düzeneği ile 100 bar helyum gazı doldurulur ve ısıl denge sağlanana kadar 45 dakika beklenir Daha sonra tüpün basıncı 500 bar olana kadar dolun gazı basınçlı tüp içine doldurulur.

3. İçi 500 barda helyum ve argon gaz karışımı ile dolu olan basınçlı tüpün diğer gaz çıkışı da punta kaynağı ile Çizelge 4-1'de belirtilen parametrelere göre körlenir. Böylece tüp sızdırmaz hale getirilir.
4. İki ucu körlenen basınçlı tüp su dolu bir kaba daldırılarak göz ile görülebilir bir kaçak olup olmadığı tetkik edilir.
5. Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de belirtilen ASM310 model helyum kütle spektrometrelili kaçak dedektörü üzerinde bulunan vakum sensörü ile oda sıcaklığında (20-25 °C aralığında) 1.52×10^{-7} mbar l/sn helyum kaçak değerine sahip kaçak standardı ile otomatik cihaz kalibrasyonu yapılır.
6. Cihaza bağlantılar yapılmadan ve basınçlı tüp vakum odası içine konmadan önce, vakum haznesi ve bütün bağlantı noktalarının sızdırmazlık yüzeyleri isopropil alkol ile temizlenir.
7. Vakum haznesi cihaza içinde basınçlı tüp olmadan bağlanarak test edilir. Vakum haznesinde daha önceden beklenen seviyeye kadar kaçak olmadığı gözlemlendiğinde test sonlandırılır. Bu tez çalışmasında bu değer $\text{min. } 3.2 \times 10^{-10} \frac{\text{mbar.lit}}{\text{s}}$ 'dir.
8. Vakum haznesi içerisine daha sonra basınçlı tüp yerleştirilerek kaçak testi başlatılır.
9. Kaçak dedektörü kararlı ölçüm sonucu verene kadar test sürdürülür. Kararlı hale ulaşıldığında kaçak seviyesi kaydedilir ve test sonlandırılır.

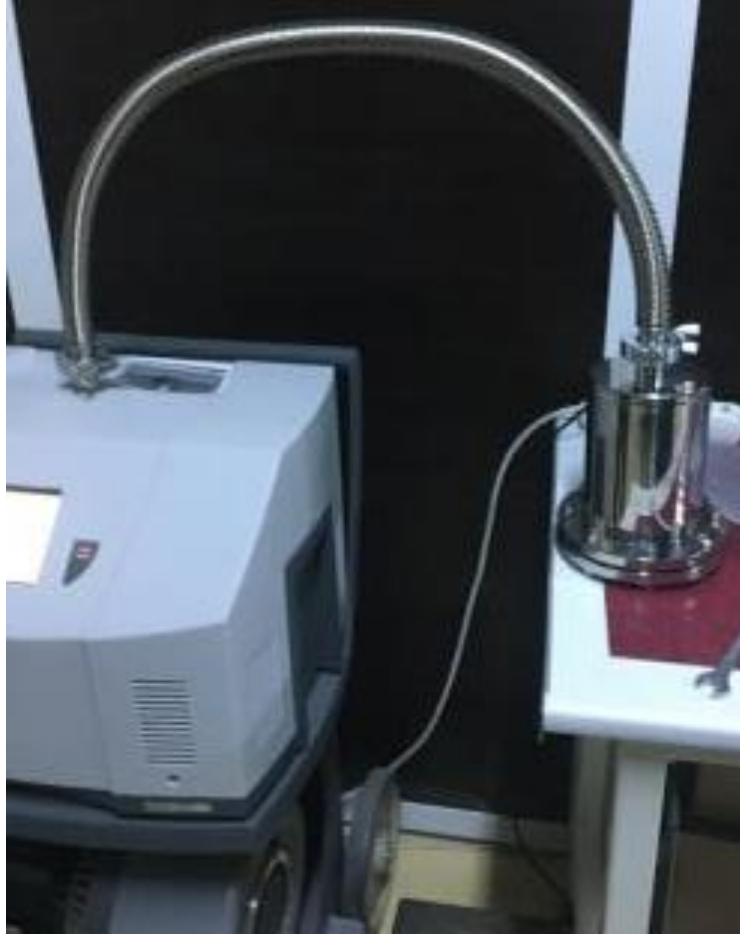
Test kompleksinin kararlı hale gelmesi için gerekli süre en az 1.5 dakikadır. Bu tez çalışmasında üzerinde çalışılan sistemin sızdırmazlık değerleri genellikle 2 dakika sonunda elde edilen verilerden alınarak değerlendirmeye katılmıştır.



Şekil 4.5 Helyum sızdırmazlık testinde kullanılan vakum haznesi ve basınçlı tüpün hazne içine yerleşimi



Şekil 4.6 Sızdırmazlık testi akış diyagramı



Şekil 4.7 Sızdırmazlık test düzeneği

5. BASINÇLI TÜP KAPSAMINDA YAPILAN EBW KAYNAK DENEMELERİ, KAYNAK KARAKTERİZASYON - PARAMETRE ÇALIŞMALARI VE YAPILAN TESTLER

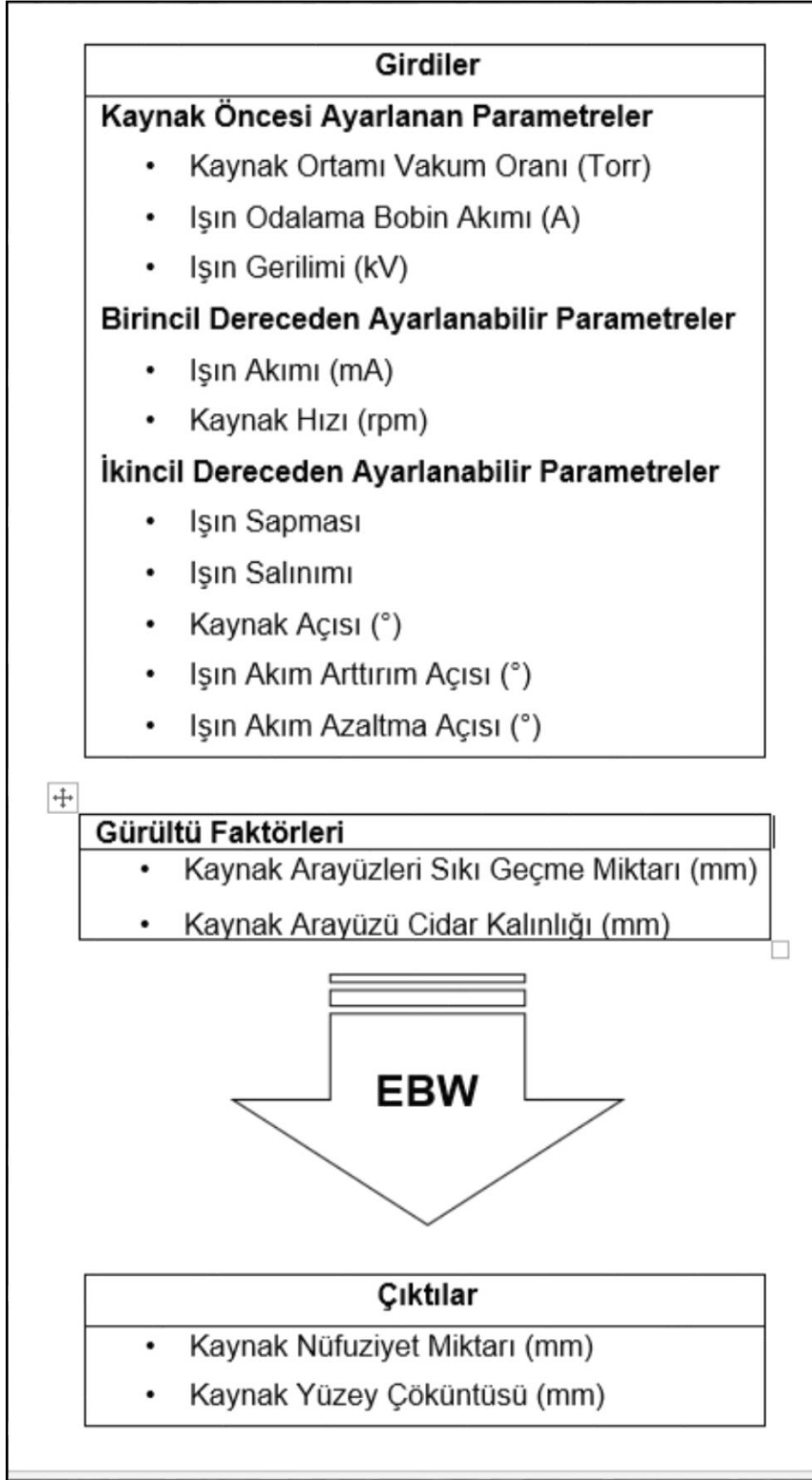
Bu tez çalışmasında kaynak yapılacak olan arayüzlerin EBW kaynağında, İzmir Serbest Bölgede bulunan Kale Pratt&Whitney bünyesinde bulunan 60 kV'lık EBW 88 kaynak cihazı kullanılmıştır.



Şekil 5.1 EBW 88 kaynak tezgahına ait görüntü [28]

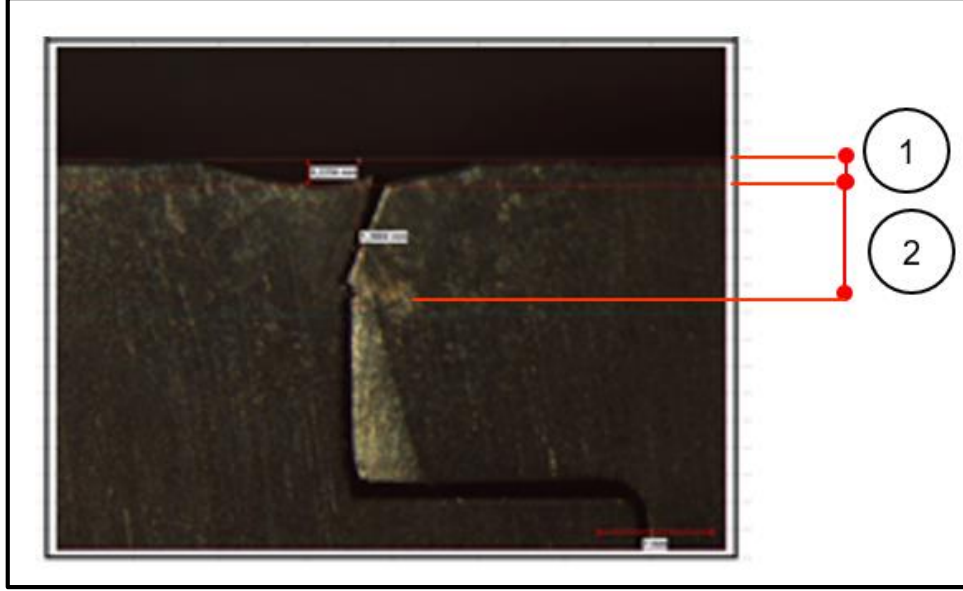
Kaynak yapılan tezgah kabiliyetleri olarak, kaynak tezgahı oda ölçüleri 2235x1727x2794 mm şeklindedir. Kaynak zarfı 1295 mm genişlik, 838 mm derinlik ve 1600 mm yüksekliğinde olacak şekilde 1727 mm genişliğinde, 838 mm derinliğinde, 1600 mm yüksekliğinde parça büyüklüğünü kaynatmaya elverişlidir. Kaynak odası 10^{-4} Torr; yani yüksek vakum seviyesine sahip bir vakum odasına sahiptir. Cihaz bunun yanında 5 eksen CNC kontrollü tezgah mantığına göre çalışabilmektedir.

Kaynak parametre çalışmalarına başlamadan önce deney ve deneme sayısını makul bir seviyede tutmak amacıyla EBW literatür bilgileri doğrultusunda; EBW kaynağı girdi, gürültü ve çıktı ilişkisi kurulmuş olup; Şekil 5.2'de belirtildiği gibi deneyler yapılmıştır.



Şekil 5.2 Kaynak parametre denemeleri sistem modelleme yaklaşımı; elektron ışın kaynağı girdi, gürültü, çıktı ilişkisi

Şekil 5.2’de modelleme çıktısı olarak belirtilen ve Şekil 5.3’te gösterilen kaynak yüzey çöküntüsü, kaynak boyunca elektron ışınının kaynak arayüz bölgesinde bulunan malzemede oluşturduğu çukurlaşma miktarını; kaynak nüfuziyet miktarı ise elektron ışınının kaynak yüzey çöküntüsünden, kaynak köküne kadar olan birleşme miktarını belirtmektedir.

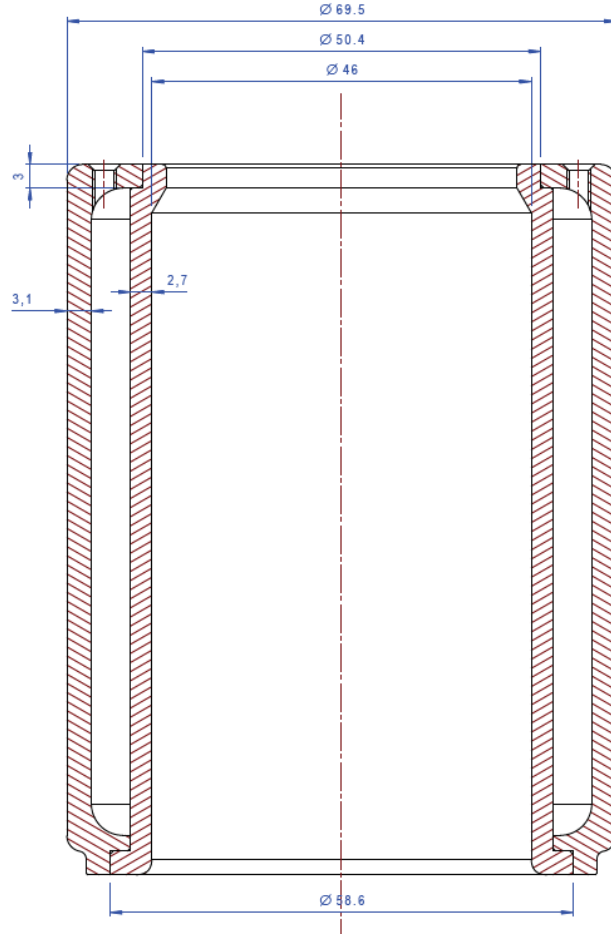


Şekil 5.3 Kaynak yüzeyi yüzey çöküntüsü (1) ve kaynak nüfuziyet miktarına ait X-ray makro görüntüsü

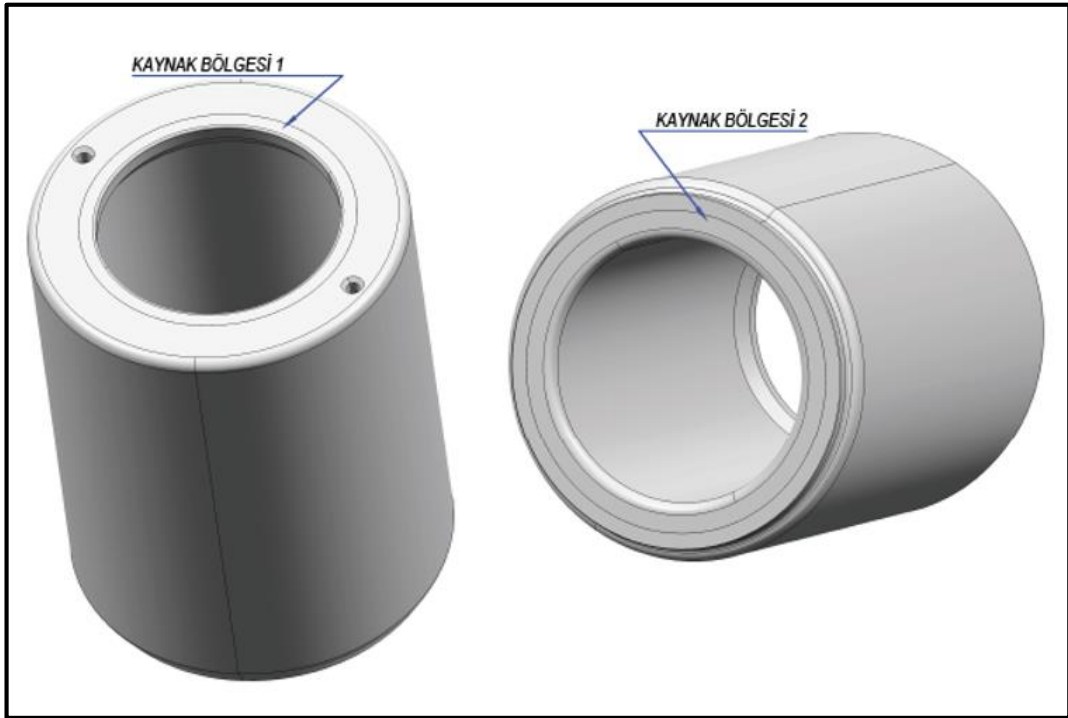
5.1. EBW Parametre Karakterizasyon ve İlk Kupon Denemeleri

Bu tez çalışmasında elektron ışın kaynağı parametre karakterizasyonu ve test sonuçlarının değerlendirilmesi aşamasında Minitab programı ile varyansların analizi yöntemi kullanılarak deney tasarımları yapılmış ve bu deneyler sonucunda parametre karakterizasyonu ve nihai elektron ışın kaynak parametre setinin elde edilmesi hedeflenmiştir.

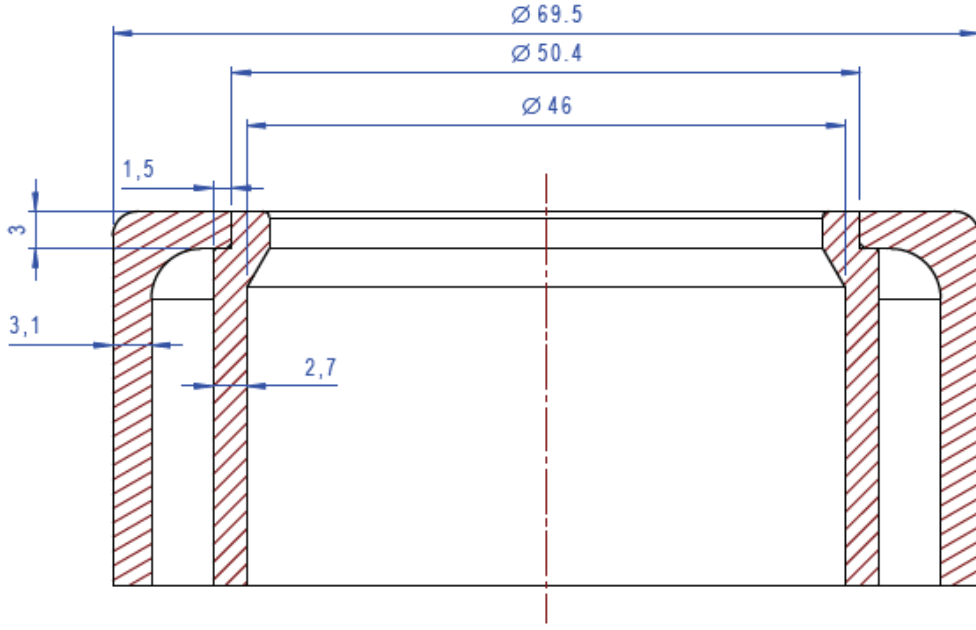
İlk kaynak kuponu denemelerinde kullanılan ve kupon geometrisine girdi sağlayan basınçlı tüp geometrisi ve temel ölçüleri Şekil 5.4’te belirtildiği gibidir. Şekil 5.5’te kaynak bölge tanımlamaları belirtilen basınçlı tüpün; Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de kaynak bölgesi temel ölçüleri bulunmaktadır. Belirtildiği üzere ilk kaynak kuponu denemelerinde, kaynak bölgeleri cidar kalınlığı 3 mm olarak değerlendirilmiştir. Basınçlı tüp boylamasına ekseni boyunca, aksenal kuvvetlerin radyal kuvvetlerden daha düşük olması bilinmesine rağmen; kaynak nüfuziyet miktarına bağlı kaynak parametrelerinin çıkarılması için tasarım girdisi olarak tüp kaynak bölge kalınlıkları 3 mm olarak ilk denemeler yapılmıştır.



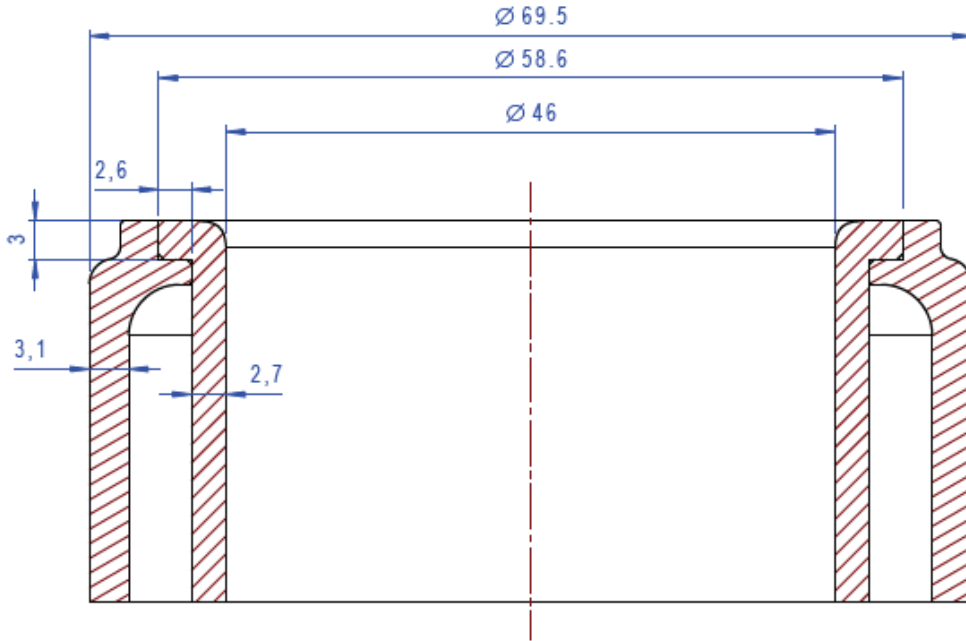
Şekil 5.4 İlk kupon denemelerinde kullanılan tüp geometrisi ve temel ölçüleri



Şekil 5.5 İlk kupon denemelerinde kaynak uygulanan yüzeylerin tanımlanması



Şekil 5.6 İlk kupon denemeleri kaynak bölgesi 1



Şekil 5.7 İlk kupon denemeleri kaynak bölgesi 2

Bunun yanında, aynı parametreler kullanıldığında, elektron ışınının malzemeye aktaracağı enerji aynı olmaktadır. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de ölçüleri belirtilen kaynak bölge geometrilerindeki farklılıklar, termal kütle farklılığına sebep olmaktadır. Termal kütlenin farklı olması, aynı parametre seti kullanıldığında farklı kaynak nüfuziyet değerleri elde edilmesine sebep olacağı değerlendirilmektedir. Bu

nedenle kaynak kupon denemeleri yapılırken bu etkinin baskın olup olmadığının görülebilmesi için her iki arayüz geometrisi de kupon olarak kullanılmıştır. Kupon denemelerine başlamadan önce Şekil 5.2’de belirtilen ve kaynak öncesi ayarlanması gereken parametre değerleri belirlenmiştir. Belirlenen değerler Çizelge 5-1’de belirtildiği gibidir.

Çizelge 5-1 İlk kupon denemeleri, EBW kaynağı öncesi belirlenen değerler

| Parametre Tipi | Belirlenen Değer |
|----------------------------------|---|
| Kaynak Ortamı Vakum Oranı (Torr) | 10^{-4} |
| Işın Odalama Bobin Akımı (A) | 4.7 |
| Işın Gerilimi (kV) | $5 \text{ mA} \geq \text{Işın Akımı}; 40$ |
| | $5 \text{ mA} < \text{Işın Akımı} \leq 10 \text{ mA}; 50$ |

EBW kaynak tezgahı vakum miktarı, titanyum malzemesi ile çalışıldığı için kaynak süresince malzemeye ısı girdisinden dolayı kaynak bölgelerinde oluşabilecek oksitlenmeyi engellemek ve en üst seviyede GTWD ölçüsünü kullanabilmek için 10^{-4} torr olarak belirlenmiştir. GTWD değerinin en üst ölçüsünde kullanıldığında; daha önceden de belirtildiği üzere ortamda bulunan herhangi bir gazdan dolayı ışın etkilenmekte ve sapmaktadır. GTWD’nin en üst seviyede kullanılmasının sonuçlarından biri de ışın odaklama bobin akımının 4.7 A olarak elde edilmesini sağlamaktır. Bu değerde kaynak bölgeleri üzerinde bulunan ışının çapı yaklaşık olarak 0.9 ile 1 mm arasında değişmektedir. Bu değer bu tez çalışmasında elde edilecek ürün için önemi, basınçlı tüpün gaz girişini ve çıkışını sağlayan deliklerin kaynak yüzeyinde bulunmasıdır. Bu deliklerin kaynak esnasında, kaynaktan etkilenerek zarar görmemesi için GTWD artırılıp; ışın odaklama bobin akımı değeri yani ışın çapı sabit tutulmuştur. Işın gerilimi ise kaynak tezgahının kabiliyetlerinden dolayı elde edilen bir değerdir ve ışın akım değerine bağlıdır. Işın akım değeri 5 mA in altında olduğunda EBW tezgahı otomatik olarak 40kV ışın gerilim değeri verirken; ışın akım değeri 5mA’den büyük olduğunda, tezgah otomatik olarak ışın gerilimini 50 kV değerine çekmektedir.

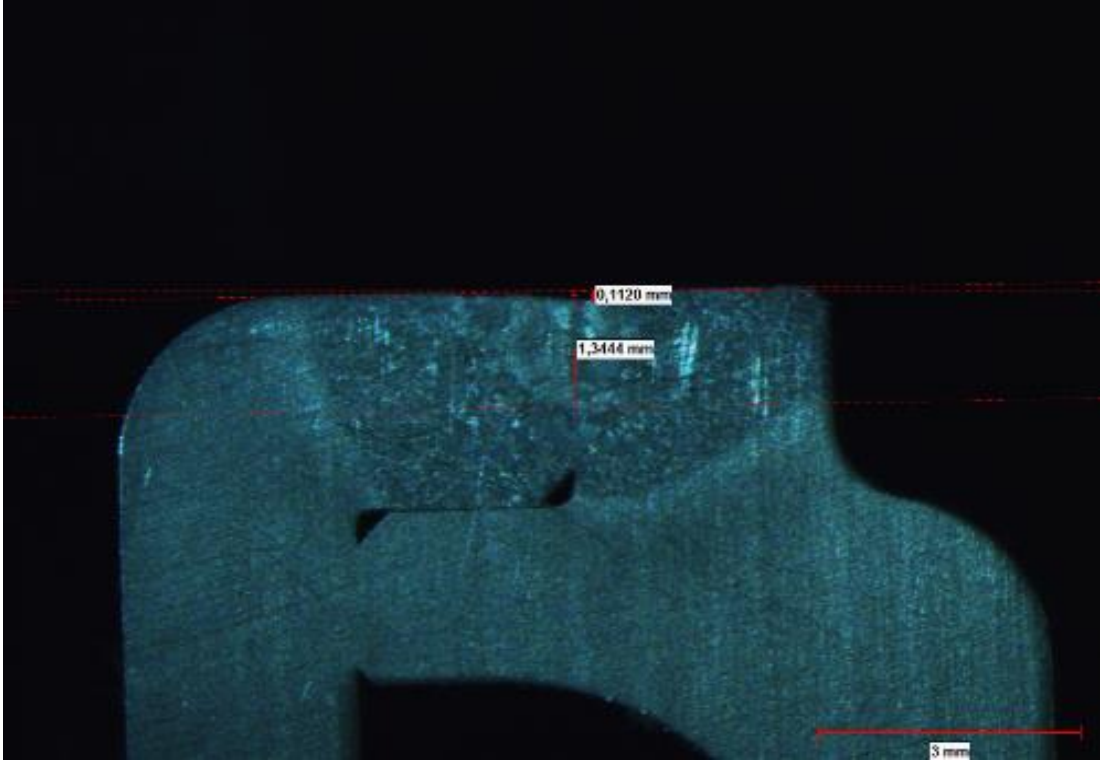
Çizelge 5-2’de görüldüğü üzere ilk kupon denemeleri, rastgele yapılan kontrolsüz deneylerdir. Bu deneyler, değişken parametre seti ile kaynak nüfuziyet miktarları hakkında bilgi edinmek; kaynak parametre karakterizasyonu, yani baskın parametrelerin belirlenmesi ve nihaî yapılacak kontrollü deney veya deneylerin

parametre setlerine karar vermek amacıyla yapılmıştır. Özetle ilk kupon çalışmasındaki amaç, ulaşılması istenilen ve kaynak performansına doğrudan etkisi olan kaynak penetrasyon değerlerinin sınır koşullarını belirlemek, etkisi az olan parametreleri ise deney setinden çıkarmaktır. Çizelge 5-2’de belirtilen kupon denemelerine ait makro kupon görüntüleri ve kaynak bölgelerinin durumu Şekil 5.8, Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11, Şekil 5.12, Şekil 5.13, Şekil 5.14, Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17’de belirtildiği gibidir. Şekillerde belirtilen değerler mm’dir.

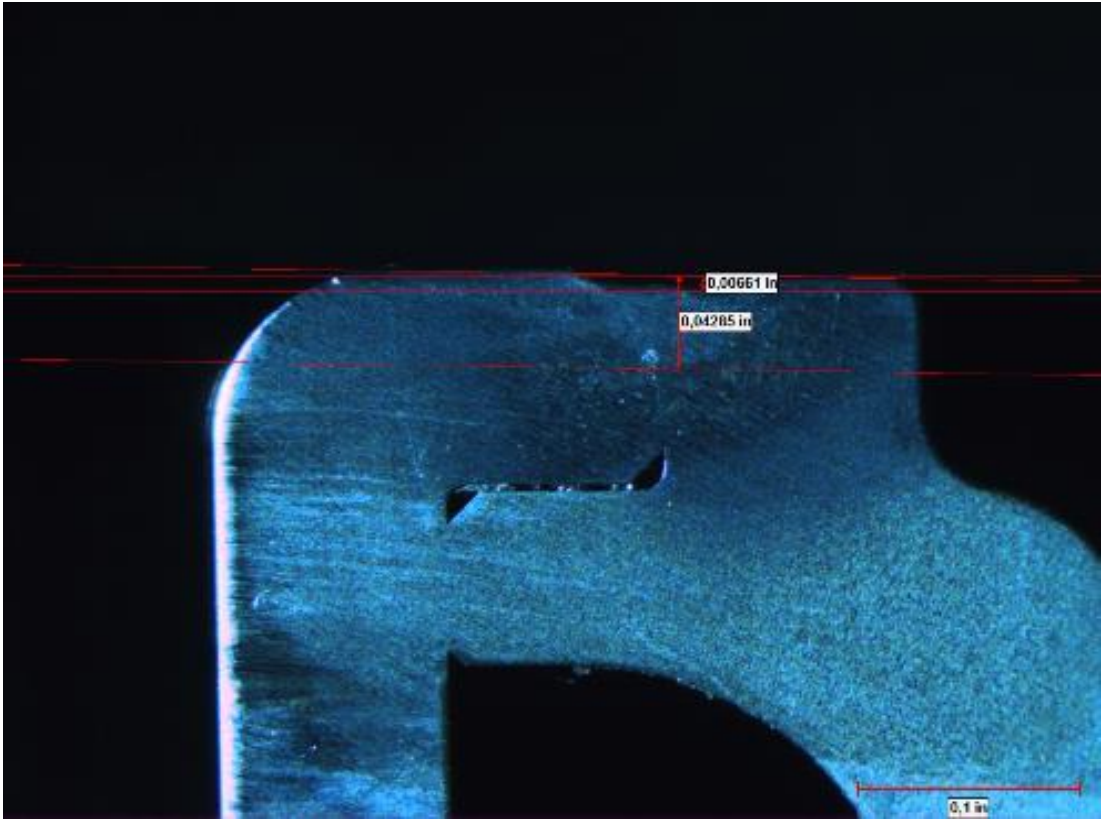
Çizelge 5-2 İlk kaynak kuponu parametre seti ve elde edilen kaynak nüfuziyet değerleri

| Kupon No | Işın Odaklama Bobin Akımı (A) | Girdiler | | | | | | Çıktılar | |
|----------|-------------------------------|-----------------|--------------------|-------------------|------------------------------|------------------------------|------------------|-----------------------|---------------------------|
| | | Işın Akımı (mA) | Işın Gerilimi (kV) | Kaynak Hızı (rpm) | Işın Akımı Artırım Açısı (°) | Işın Akımı Azaltım Açısı (°) | Kaynak Açısı (°) | Kaynak Nüfuziyet (mm) | Kaynak Yüzey Çöküntü (mm) |
| 1 | 4.7 | 4.8 | 40 | 4.5 | 10 | 20 | 360 | 1.34 | 0.11 |
| 2 | | 5 | | 4 | 10 | 20 | 360 | 1.08 | 0.15 |
| 3 | | 5.5 | 50 | | 4.5 | 10 | 10 | 360 | 1.90 |
| 4 | | 5.7 | | 10 | | 30 | 360 | 1.89 | 0.14 |
| 5 | | 6 | | 4 | 20 | 20 | 360 | 2.02 | 0.14 |
| 6 | | 6.3 | | | 20 | 20 | 360 | 2.05 | 0.14 |
| 7 | | 6 | | | 5 | 5 | 365 | 1.74 | 0.15 |
| 8 | | 6 | | | 5 | 30 | 365 | 1.67 | 0.18 |
| 9 | | 6 | | | 10 | 30 | 370 | 1.81 | 0.28 |
| 10 | | 6.8 | | | 10 | 30 | 360 | 2.12 | 0.08 |

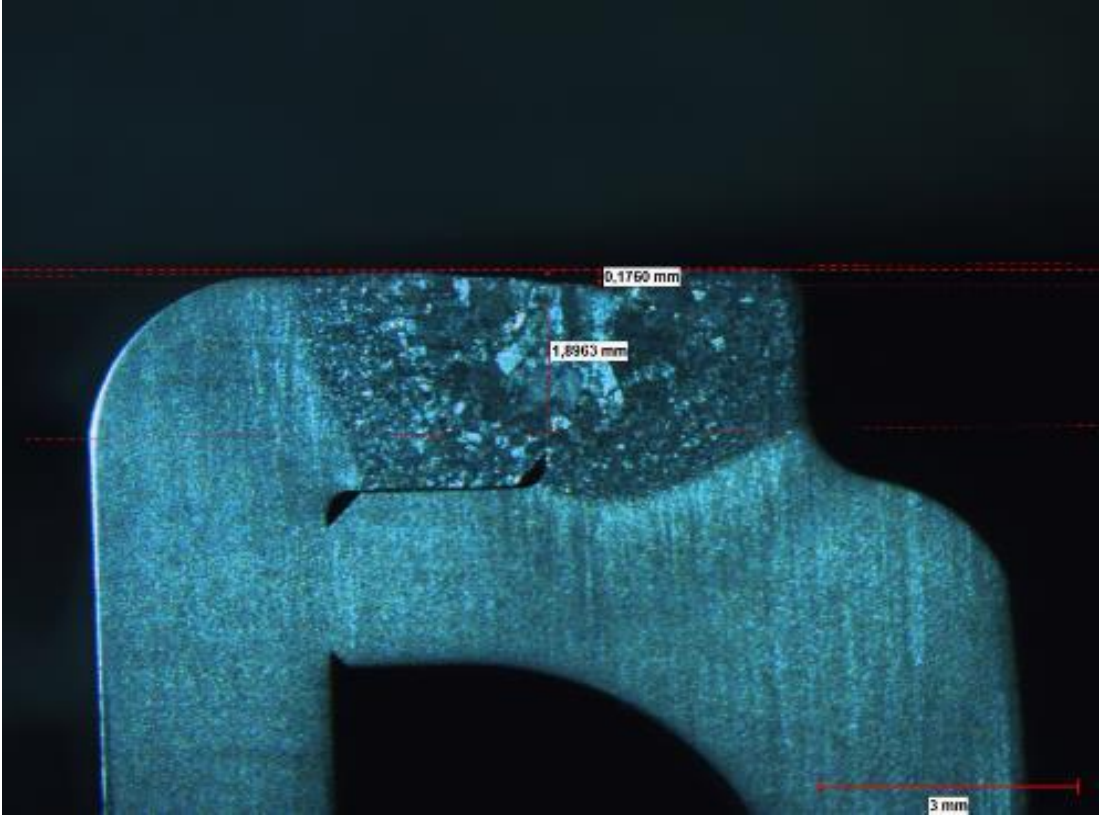
Kaynak nüfuziyeti, EBW kaynak parametre değişkenleri kapsamında elde edilen ve 5.2’de belirtilen verilerin analizi ile incelenmiştir. Veri analizi yapmadan önce ışın akım artırım ve azaltım açısı ve kaynak açı değeri nihai kaynak kalitesini etkileyeceği bilindiğinden, kaynak yapılan ve karar verilen değişken parametre setinde, görsel muayene sonucu karar verilmiştir. Bu nedenle veri analizinde ana girdi değişken olarak ışın akımı ve kaynak hızı değerlendirmeye katılmıştır. Bu durum, 5.2’de gerekçeleriyle detaylandırılmaktadır.



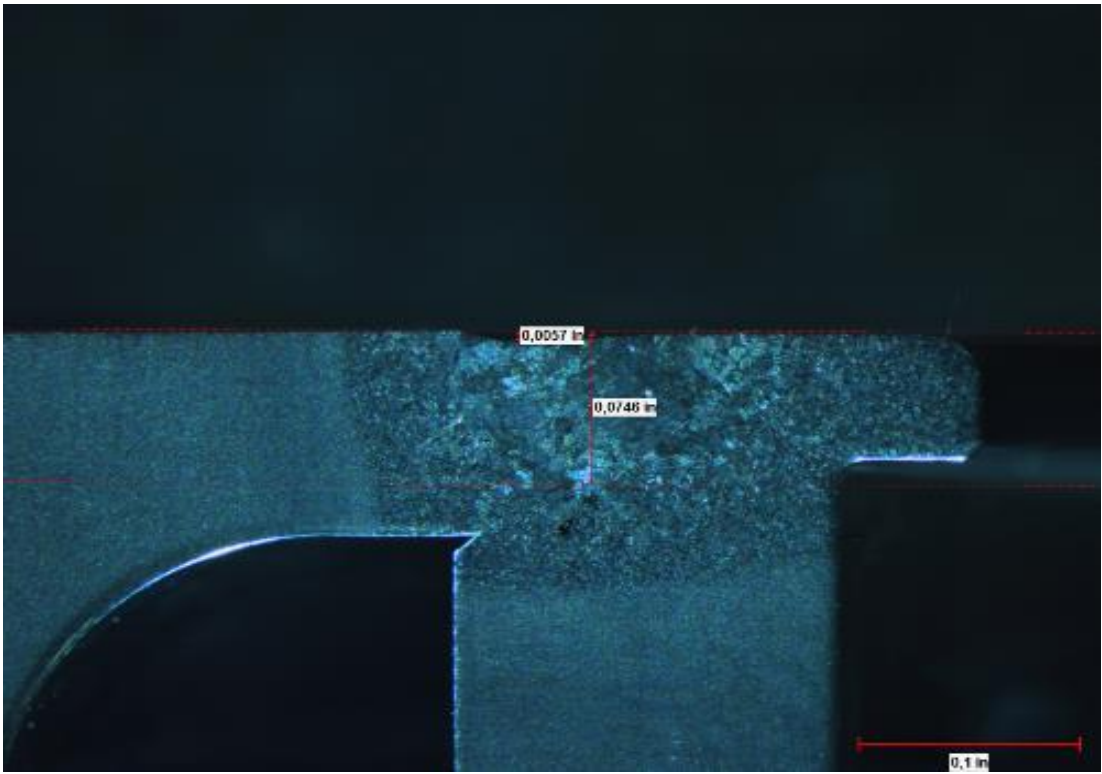
Şekil 5.8 Kupon 1 kesiti makro görüntü (KN: 1.34, KYÇ: 0.11) / Kaynak bölgesi 2



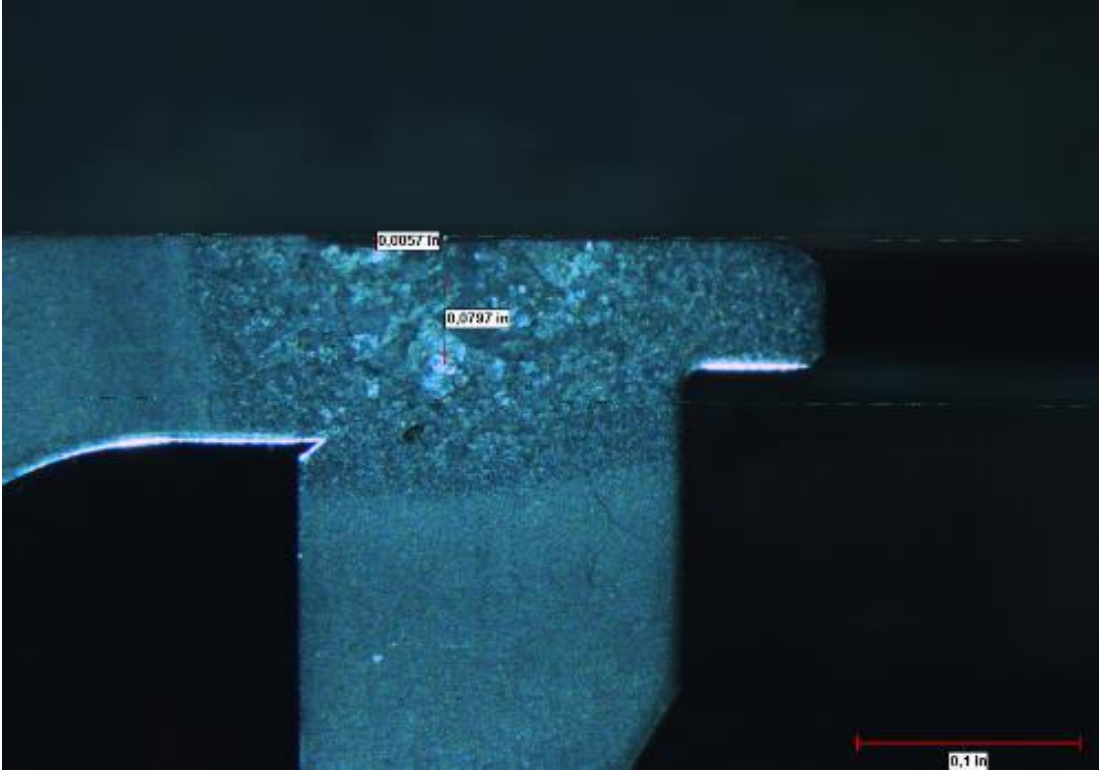
Şekil 5.9 Kupon 2 kesiti makro görüntü (KN: 1.08, KYÇ: 0.15) / Kaynak bölgesi 2



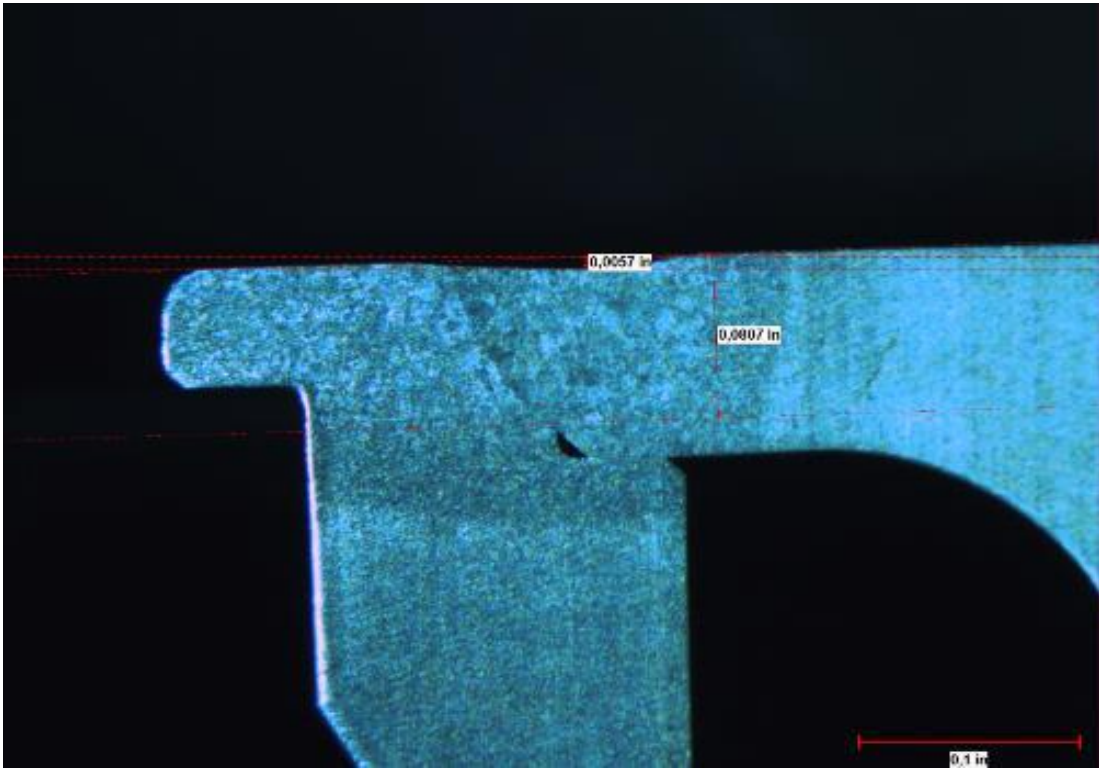
Şekil 5.10 Kupon 3 kesiti makro görüntü (KN: 1.90, KYÇ: 0.18) / Kaynak bölgesi 2



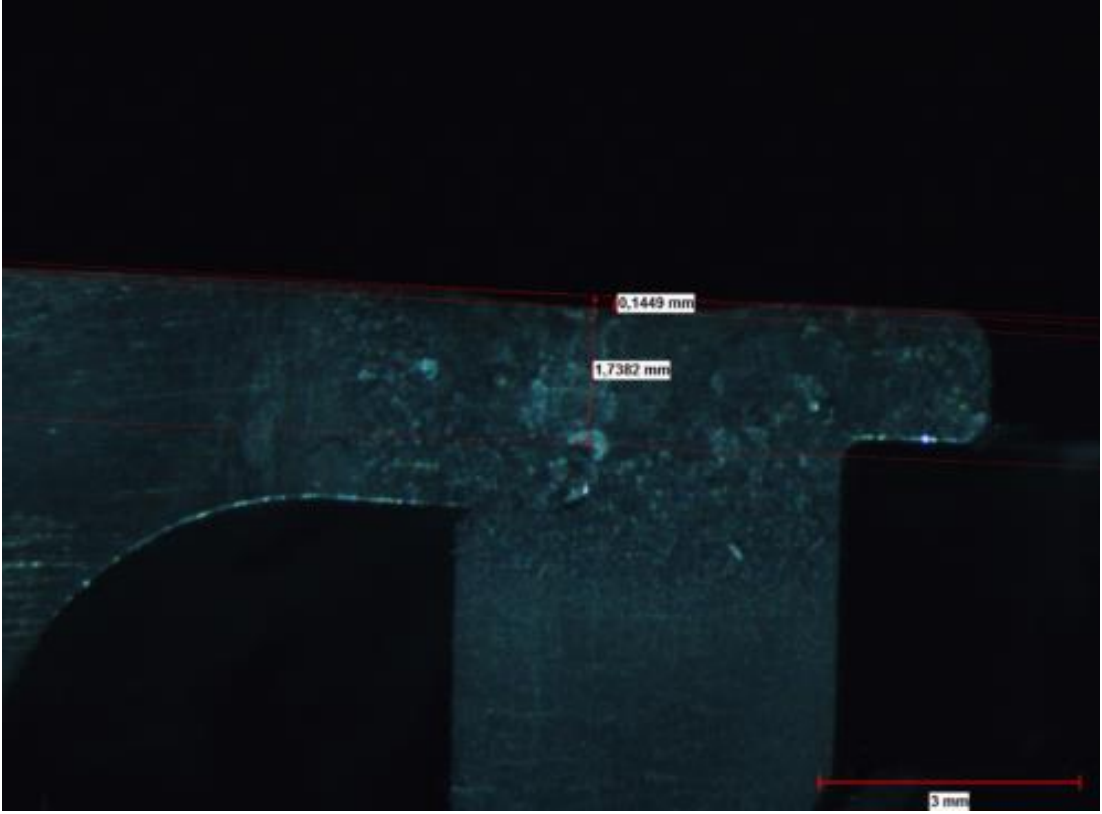
Şekil 5.11 Kupon 4 kesiti makro görüntü (KN: 1.89, KYÇ: 0.14) / Kaynak bölgesi 1



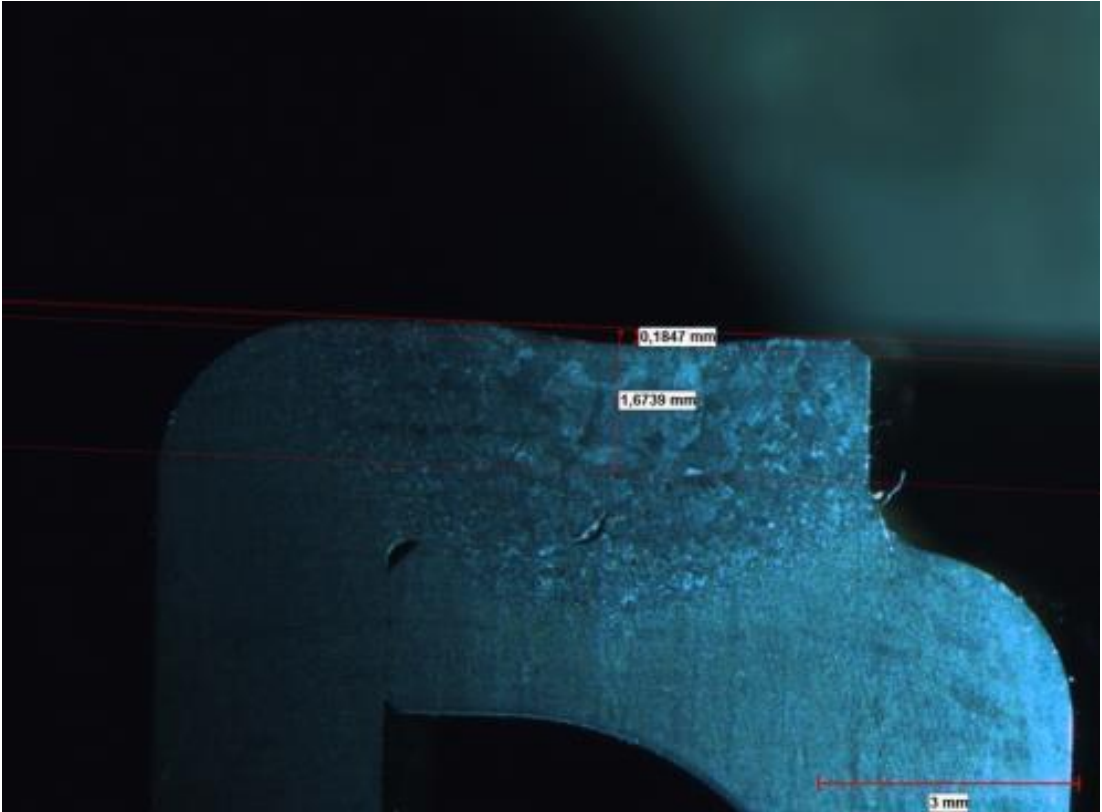
Şekil 5.12 Kupon 5 kesiti makro görüntü (KN: 2.02, KYÇ: 0.14) / Kaynak bölgesi 1



Şekil 5.13 Kupon 6 kesiti makro görüntü (KN: 2.05, KYÇ: 0.14) / Kaynak bölgesi 1



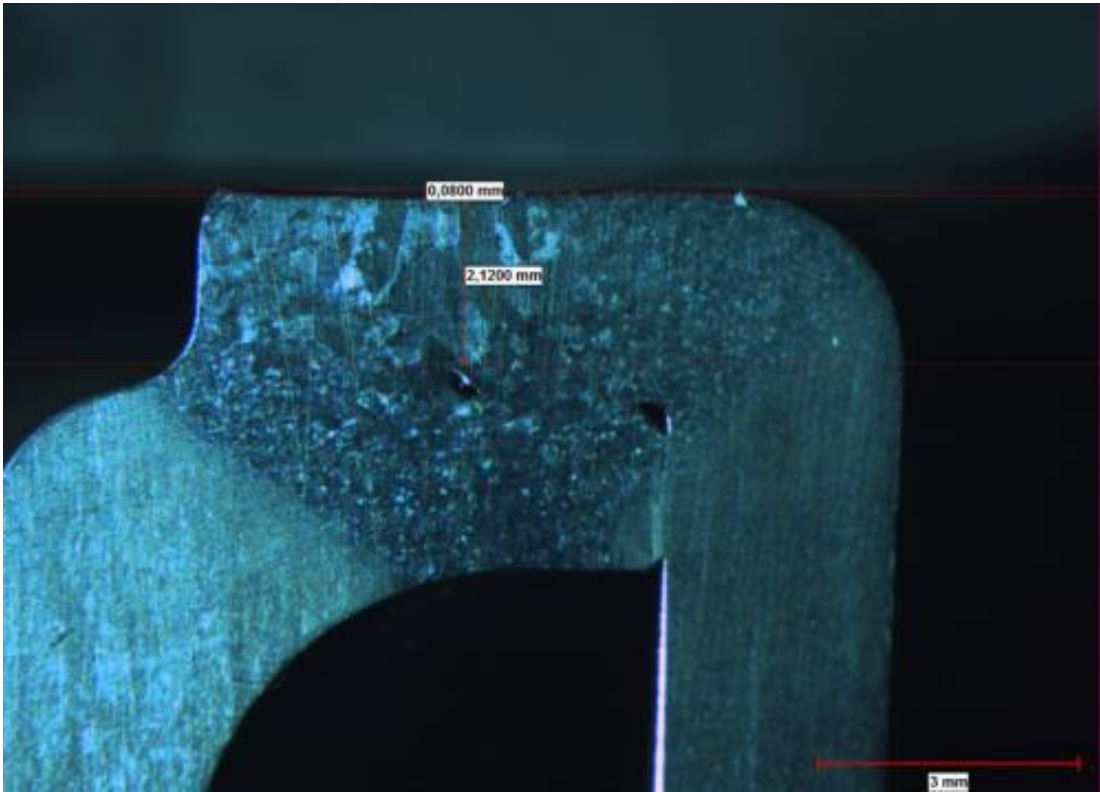
Şekil 5.14 Kupun 7 kesiti makro görüntü (KN: 1.74, KYÇ: 0.15) / Kaynak bölgesi 1



Şekil 5.15 Kupun 8 kesiti makro görüntü (KN: 1.67, KYÇ: 0.18) / Kaynak bölgesi 2



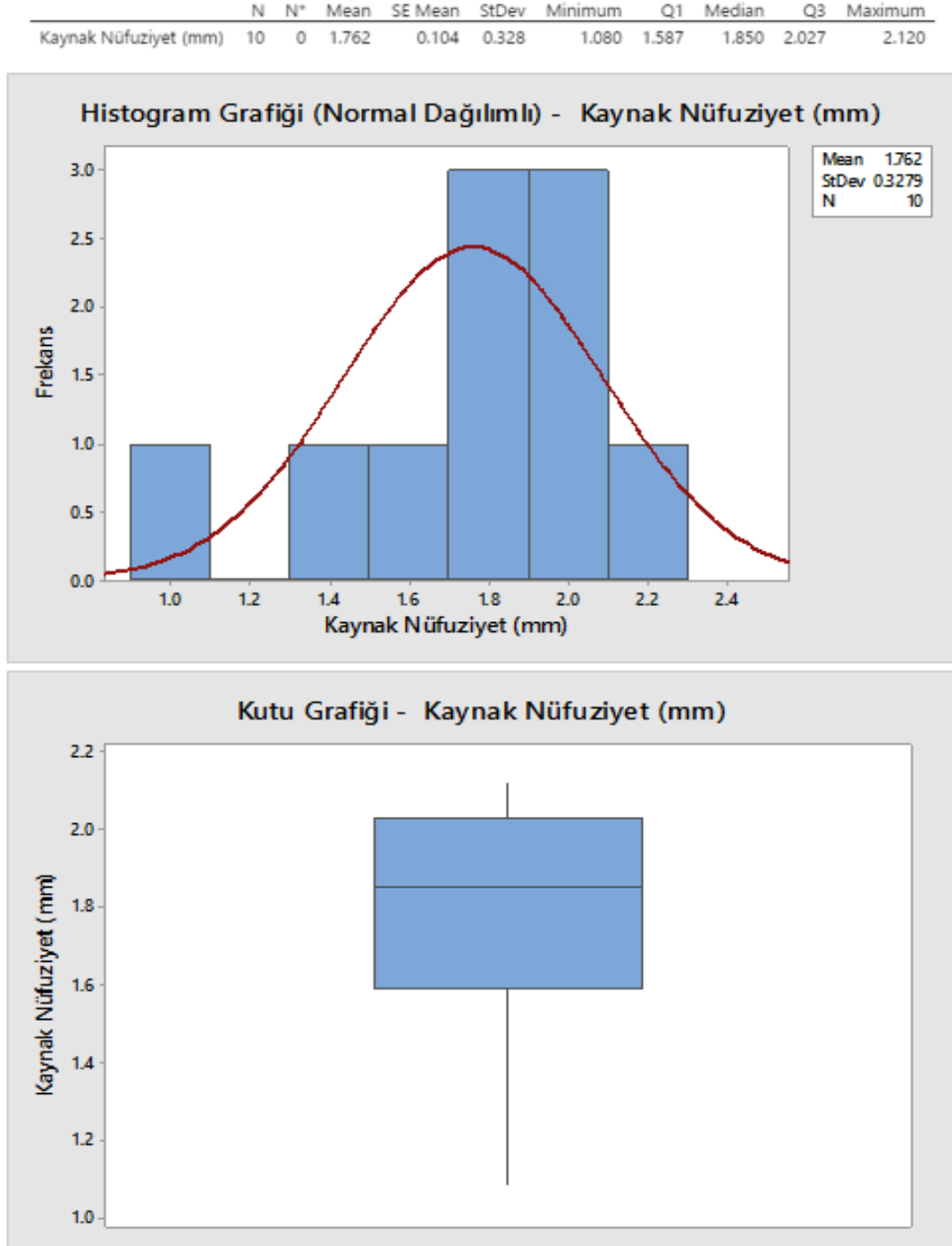
Şekil 5.16 Kupon 9 kesiti makro görüntü (KN: 1.82, KYÇ: 0.28) / Kaynak bölgesi 2



Şekil 5.17 Kupon 10 kesiti makro görüntü (KN:2.12, KYÇ: 0.08) /Kaynak bölgesi 2

5.2. İlk Kupon Denemeleri-Veri Analizi

İlk kupon denemeleri yapılırken kaynak öncesi belirlenen parametreler hariç diğer tüm denemelerde kullanılan parametreler, bir önceki kaynak kuponu görsel muayene edilerek diğer parametrelere karar verilmiş ve denemelere devam edilmiştir.

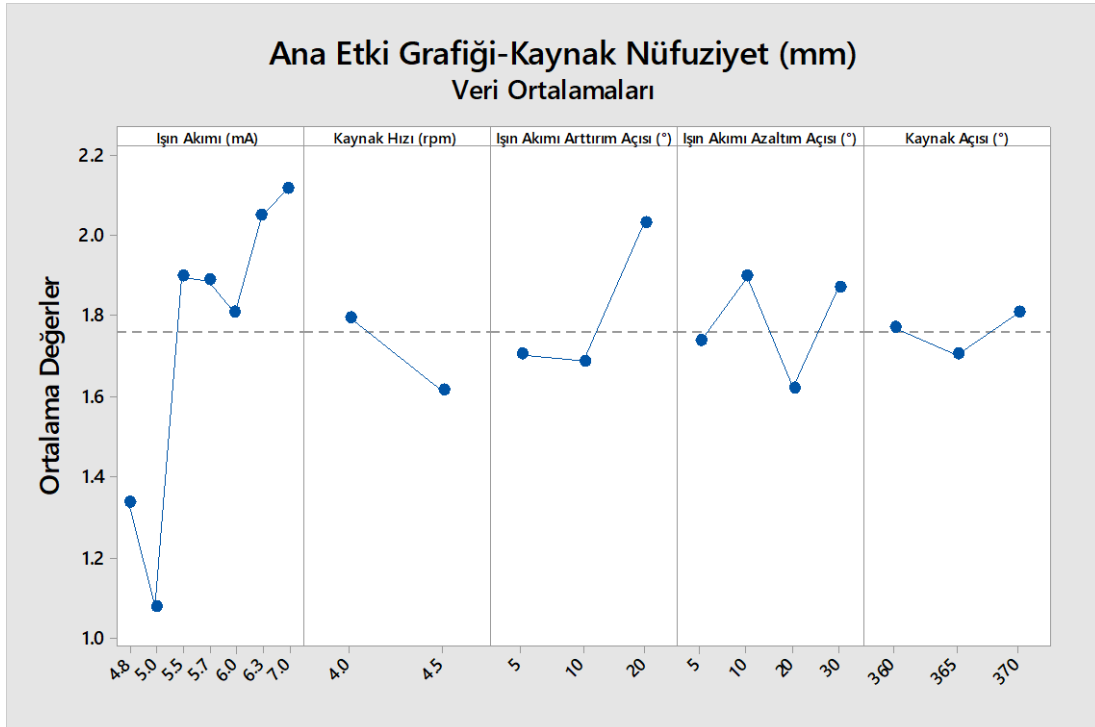


Şekil 5.18 Çizelge 5-2'deki kaynak nüfuziyet miktarlarının istatistiksel grafikleri

Veriler istatikselsel olarak değerlendirmeye katılırken toplu halde ele alınmış olup; kaynak bölgesi termal kütle farklılığının etkisi az olduğu düşünülerek göz ardı edilmiştir.

Veriler incelenirken çıktı olarak sadece kaynak nüfuziyet miktarı değerlendirmeye alınmış olup; kaynak yüzey çöküntü miktarı değerlendirmeye alınmamıştır. Final kupon parametre çalışmasından sonra kaynak yüzey çöküntü miktarı ve etkisi de değerlendirmeye alınacaktır.

Çizelge 5-2’de belirtilen parametre seti kullanılmıştır. Şekil 5.18’de Mean değeri ortalama kaynak nüfuziyet miktarını, StDev değeri kaynak numune popülasyonunun, kaynak nüfuziyet miktarına göre standard sapma değerini, Median değeri ise kaynak nüfuziyet miktarları küçükten büyüğe doğru sıralandığında ortada bulunan kaynak nüfuziyet miktarını belirtmektedir. Median değerinin, Mean değeriden daha yüksek olması kaynak nüfuziyeti açısından kullanılan parametrelerle çok küçük nüfuziyet miktarlarının elde edildiğinin ve kaynak kupon popülasyonunda hesaba katıldığıının bir göstergesidir.



Şekil 5.19 Kaynak nüfuziyet miktarı üzerinde girdi parametrelerinin tekil etkileri

Şekil 5.19’da belirtilen kaynak nüfuziyeti üzerine ana etki grafikleri incelendiğinde aşağıda belirtilen sonuçlara ulaşılmaktadır:

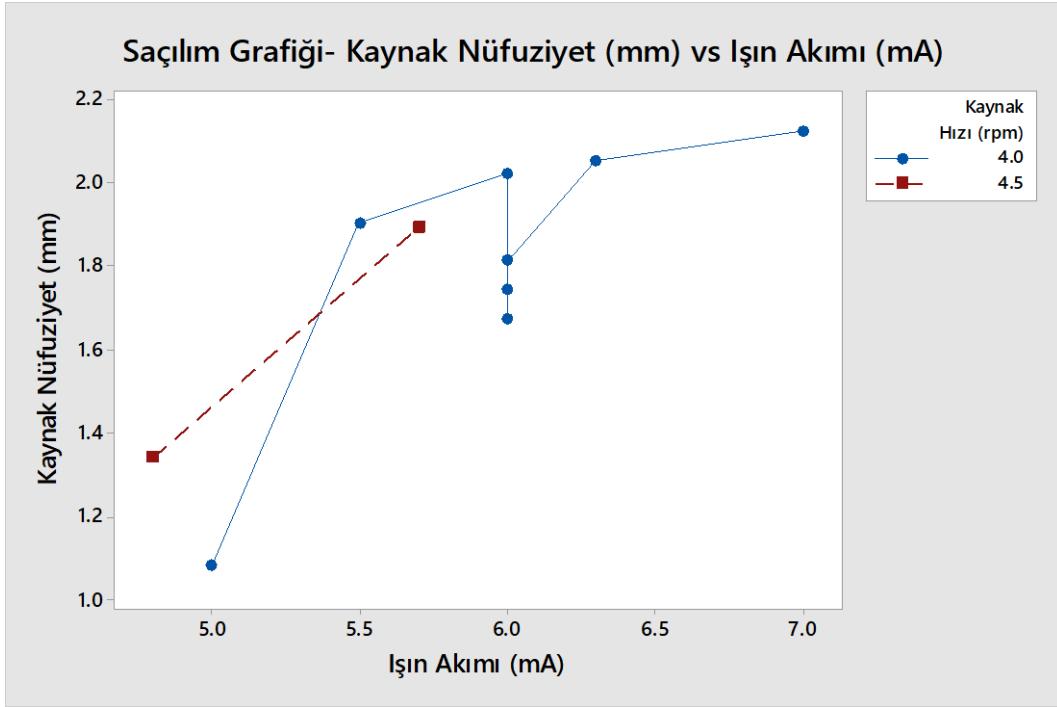
1. Işın Akımı, Kaynak Hızı ve Işın Akımı Arttırım Açısının; kaynak nüfuziyet değerinde etkisi olabileceği sonucu çıkarılabilmektedir.
2. Işın Akım Arttırım Açısı değerinin ortalama değer etrafında bir salınım göstermesinden ötürü veriler incelendiğinde; 1 ile 4 nolu kupon sonuçları karşılaştırıldığında kaynak hızı ve ışın akım arttırım açısı bu iki kupon arasında aynı olmasına rağmen kaynak nüfuziyetindeki artışın ışın akımının artmasından olduğu görülmektedir. Kaynak nüfuziyeti artış oranı hesaplandığında bu değer %41 seviyesinde olduğu hesaplanmaktadır. Bunun yanında ışın akımının ve kaynak hızının sabit olduğu; ışın akımı arttırım açısının 5° den 10° ye arttığı durumda yani kupon 8 ve 9'da kaynak nüfuziyet miktarındaki değişime bakıldığında oran %8'e yakın elde edilmektedir.

Bu bağlamda ışın akım arttırım açısının, kaynak nüfuziyet miktarına olan etkisi az olduğundan ana etki parametresi olmadığı varsayımı yapılmış olup; final kupon denemelerinde bu değer değişken değil; önceden belirlenmiş sabit bir değer olarak alınması kararı verilebilmektedir.

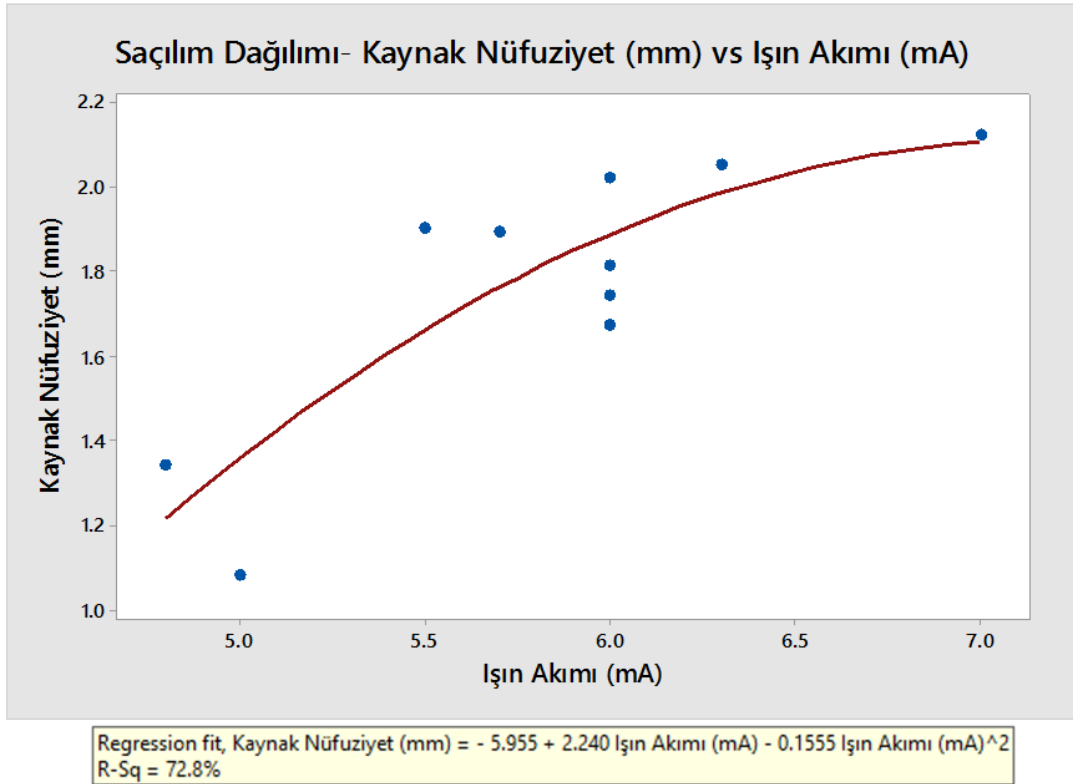
Daha önceden de belirtildiği gibi ışın akımı arttırım ve azaltım açısı veya oranı nihai kaynak yüzey kalitesini etkileyen parametreler olduğu da unutulmamalıdır. Işın arttırım veya azaltım açısının 0 olarak ele alınması elektron ışınının, ortam sıcaklığında bulunan malzemeye kaynak başlangıcında birden ulaşmasını ve kaynak arayüzünde istenilmeyen delik veya çukurların oluşmasını sağlayabilmektedir. Işın azaltım açısı ise kaynak sonlanmadan önce, elektron ışınının birden kaynak arayüzünde sonlanmasını engelleyecek ve ışın akımı belirli bir azalma miktarıyla azalarak kaynak arayüzü sonlanma bölgesinin temiz ve düzgün bir şekilde elde edilmesini sağlayacaktır. Özetle, bu parametreler düzgün bir kaynak havuzu elde etmek için kullanılmaktadır.

3. Ana girdi parametresi olarak değerlendirilebilecek ışın akımı arttıkça, kaynak nüfuziyeti artacağı sonucu çıkarılabilmektedir ve bu durum enerji aktarımı düşünüldüğünde teori ile de uymaktadır.
4. Ana girdi parametresi olarak değerlendirilebilecek bir diğer parametrenin, kaynak hızı olduğu görülmektedir. Kaynak hızı arttıkça, kaynak nüfuziyeti azalacağı sonucu çıkarılabilmektedir. Kaynak nüfuziyet ve ışın akımının; kaynak hızına göre ikili etkisi değerlendirmeye alındığında; kaynak

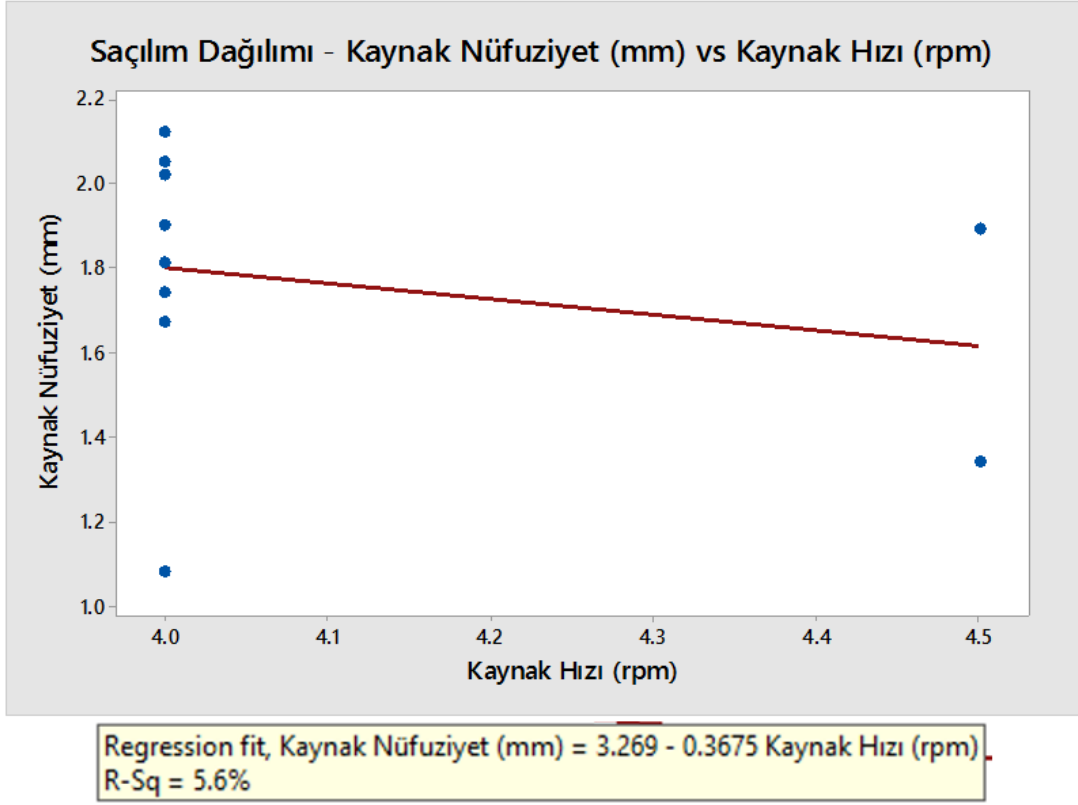
nüfuziyetinin, ışın akımıyla doğru orantılı iken; kaynak hızı ile ters orantılı olduğu Şekil 5.20'de görülmektedir.



Şekil 5.20 Kaynak nüfuziyetinin ışın akımı ve kaynak hızı ikili etkisi ile karşılaştırılması



Şekil 5.21 Kaynak nüfuziyeti üzerinde ışın akımı tekli etkisi ve formülasyonu



Şekil 5.22 Kaynak nüfuziyeti üzerinde kaynak hızı tekli etkisi ve formülasyonu

Final kupon denemelerinde bu çalışma sonucu belirlenen değerler, ana değişkenler ve seviyeleri değerlendirilecektir. Yapılacak olan final kupon deney tasarımı çalışmasında çift tekrarlı ve orta noktası da hesaba katılacak şekilde deneyin kurgulanması gerekmektedir. Bu durum Şekil 5.21'de belirtildiği üzere ışın akımının, kaynak nüfuziyetinin üzerinde ikinci dereceden bir etkisinin olmasından kaynaklanmaktadır.

Regresyon modellerine dikkat edildiğinde tekli etki regresyon denklemlerinde Rsq değeri ışın akımı için %72.8 iken; bu değer kaynak hızı için %5.6'dır. Bu durumda kaynak nüfuziyeti üzerinde ışın akımı tekli etkisinin regresyon modelinde daha doğru sonuçlar vereceğinin göstergesidir.

5.3. İlk Patlatma Testleri Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Bu bölümde 5.2 numaralı başlık altında belirtilen ilk kupon verilerinin analizi sonucunda bir yandan da basınçlı tüpün patlama performansı açısından durumunun, elektron ışın kaynağı ile kaynatılarak test edilmesi amaçlanmıştır. Patlatma testleri için daha önce 4 numaralı ana başlık altında yer alan patlatma

test prosedürü izlenmiştir. EBW kaynak parametreleri ile ilgili olarak bir önceki bölümde elde edilen veriler doğrultusunda ışın odaklama bobin akımı 4.7 A, kaynak açısı 370° , kaynak hızı ise 4 rpm olarak sabitlenmiş olup;

Çizelge 5-3'de görüldüğü üzere ışın akımı arttırım açısı 10° ile 5° arasında; ışın akım azaltım açısı kaynak kuponlarında görülen kaynak bitiş bölgesindeki geçişi daha sürekli hale getirebilmek için 30° ile 100° arasında değişken olarak ele alınmıştır. Böylece ışın akım değerinin ana değişken olarak değerlendirmeye katılması amaçlanmıştır.

Çizelge 5-3'de belirtilen patlama basıncı ve hata modlarının yanı sıra Şekil 5.23, Şekil 5.24, Şekil 5.25, Şekil 5.26, Şekil 5.27, Şekil 5.28, Şekil 5.29, Şekil 5.30, Şekil 5.31 ve Şekil 5.32'de prototiplerin patladıktan sonraki durumları gösterilen prototipler ve uygulanan parametreler incelediğinde aşağıda belirtilen sonuçlara varılmıştır:

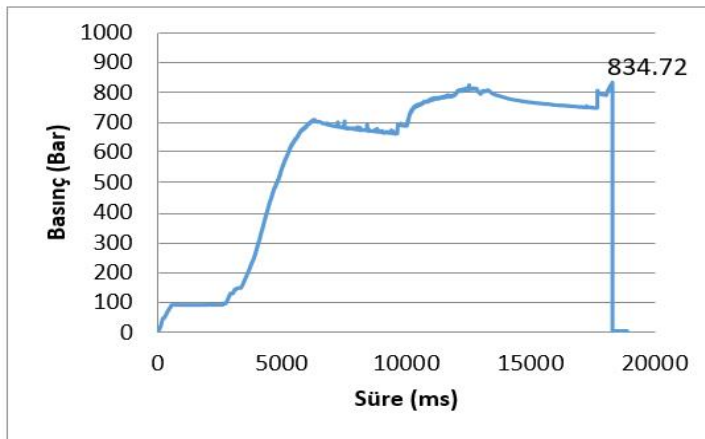
1. Basıncılı tüp cidar kalınlıkları aynı olmasına rağmen, hata modlarında elde edilen tüpün dış silindirik kısmından veya kaynak bölgesinden patlama durumu hata modunun tekrarlanabilir olmama sebebinin; her ne kadar tek değişken değerinin 1 ve 5 nolu tüpler arasında ışın akımı değeri olsa da; ışın akım değerinin bu hataya sebep olamayacağı düşünülmüştür.
2. Bu bağlamda 3 ve 4 nolu basıncılı tüpler kesilip incelendiğinde 4 nolu basıncılı tüpün dış silindir et kalınlık değeri 3.1 mm iken; 3 nolu basıncılı tüpün dış silindirik kısım et kalınlığı 3.1 mm olması gerekirken 2.7 mm olarak tespit edilmiştir.
3. Diğer radyal olarak patlayan basıncılı tüplerin ağırlıkları incelendiğinde; kaynak arayüzünden patlayan tüplere göre yaklaşık 40 gr daha hafif olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sebeplerden ötürü, radyal olarak, boylamsal dış silindirik kısımlardan yarılan tüplerin hata modlarının et kalınlığı doğru olan 3.1 mm ye sahip basıncılı tüplerin hata modunu göstermemesi uygun bulunmaktadır. Bununla birlikte iç ve dış silindirik kısım çapları farklı olmasına rağmen kalınlıklarının aynı olması, kaynağın mukavemet sınırları dahilinde; basıncılı tüpün dıştan patlamasından başka bir ihtimal bulunmamaktadır. Nominal tüp ağırlığı yaklaşık 450 gr gelmektedir.
4. Bunun yanında hata modu, kaynak birleşme noktasından olan, 4.5 mA ışın akımı değerine ve sırasıyla 5° ve 100° ışın akımı arttırım ve azaltım açısına sahip olan 7 numaralı basıncılı tüp patlatıldıktan sonra kaynak arayüzleri

radıyografık muayene yapılarık incelenmiştir. Kaynak arayüzlerine ait X-ray makro görüntüleri Şekil 5.33 ve Şekil 5.34'te verilmiştir.

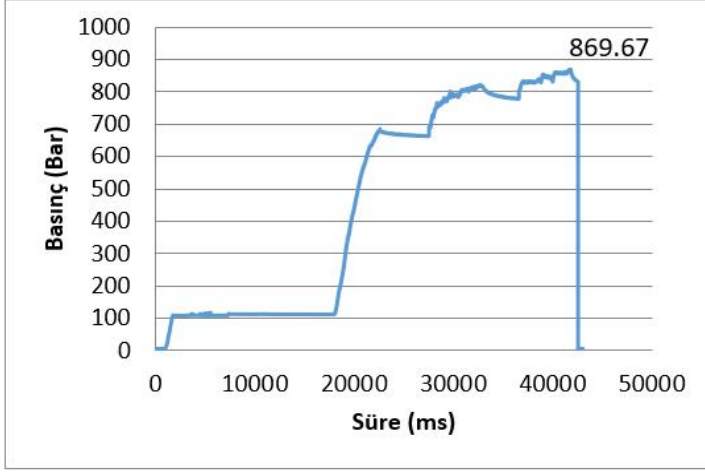
- Kaynak arayüzlerinde yapılan muayenelerde kaynak nüfuziyet miktarlarında aynı parametreler kullanılmasına rağmen farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. Patlayan arayüzde kaynak nüfuziyeti 1.27-1.37 mm aralığından değişiklik gösterirken; diğer patlamanın olmadığı yüzeyde ise bu değer 1.34-1.58 mm aralığında elde edilmiştir. Burada tek fark kaynak yapılan yüzeyler arasındaki termal kütle farkı olduğundan; sebebin bu olduğu değerlendirilmektedir.

Çizelge 5-3 İlk basınçlı tüp patlama testi sonuçları

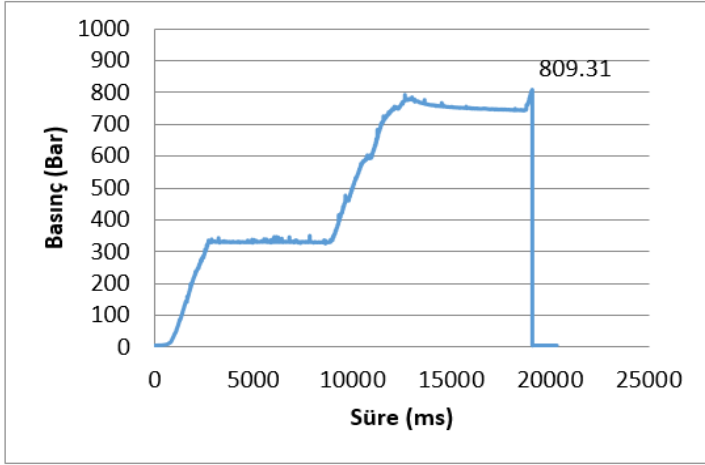
| Tüp No | Girdiler | | | Çıktı ve Sonuçlar | |
|--------|-----------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------|--|
| | Işın Akımı (mA) | Işın Akımı Arttırım Açısı (°) | Işın Akımı Azaltım Açısı (°) | Patlama Basıncı (bar) | Hata Modu |
| 1 | 6.0 | 10 | 30 | 835 | Radyal olarak dış silindirik kısımdan yarıldı. |
| 2 | 6.5 | | | 870 | |
| 3 | 6.0 | | | 809 | |
| 4 | 5.2 | | | 874 | Kaynak arayüzü çevresel olarak birleşme yüzeyinden yırtıldı. |
| 5 | 5.2 | 5 | 100 | 859 | Radyal olarak dış silindirik kısımdan yarıldı. |
| 6 | 5.2 | | | 811 | |
| 7 | 4.5 | | | 826 | Kaynak arayüzü çevresel olarak birleşme yüzeyinden yırtıldı. |
| 8 | 4.5 | | | 849 | |
| 9 | 6.5 | | | 879 | Radyal olarak dış silindirik kısımdan yarıldı. |
| 10 | 6.5 | 882 | | | |



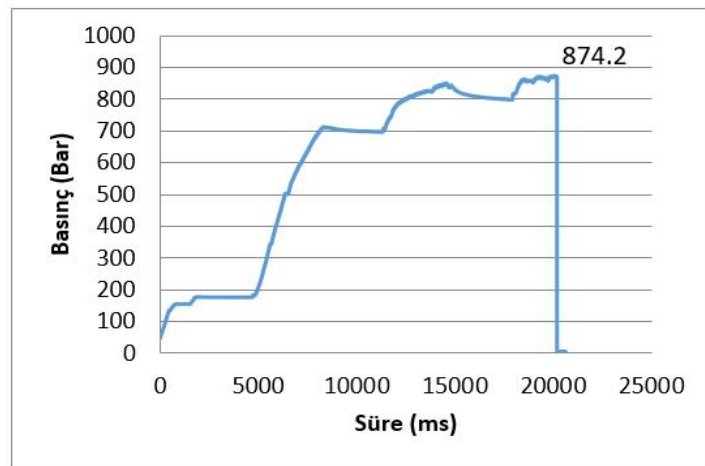
Şekil 5.23 1 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip



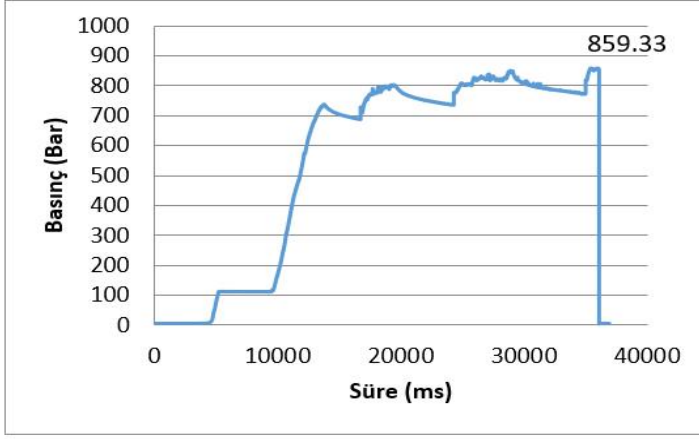
Şekil 5.24 2 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip



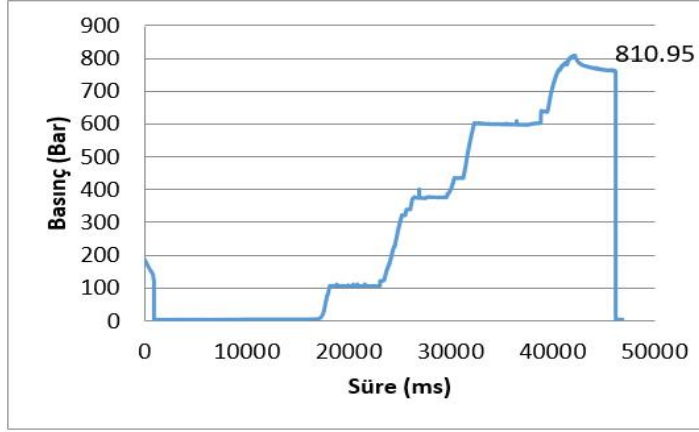
Şekil 5.25 3 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip



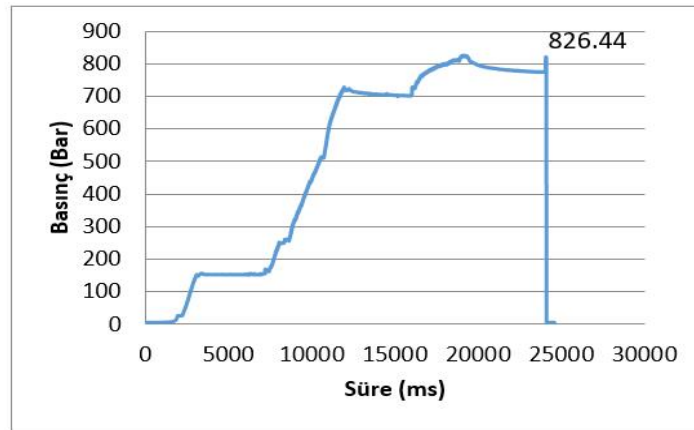
Şekil 5.26 4 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip



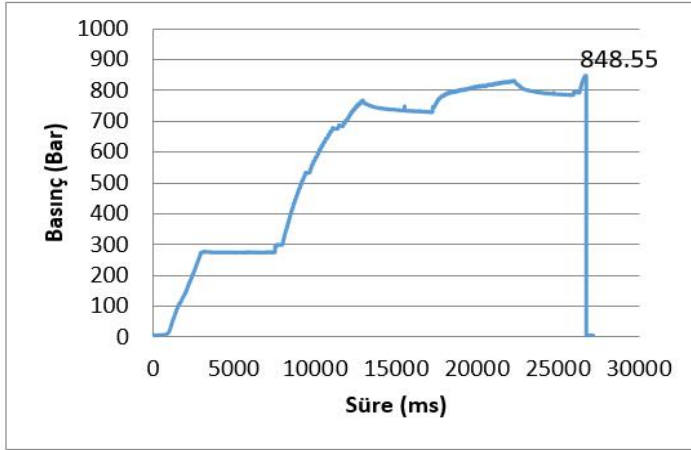
Şekil 5.27 5 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip



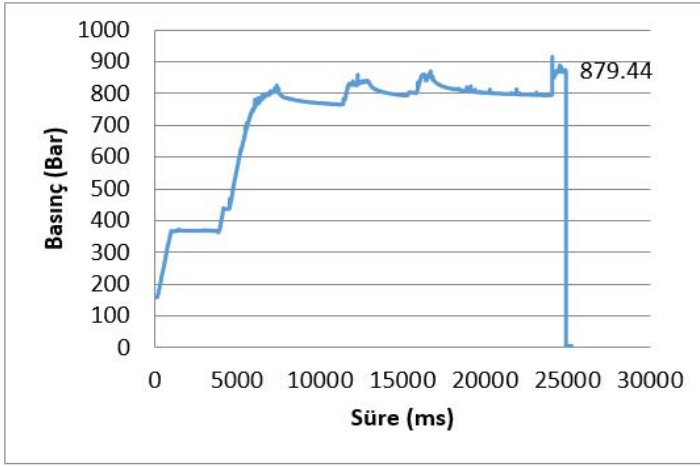
Şekil 5.28 6 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip



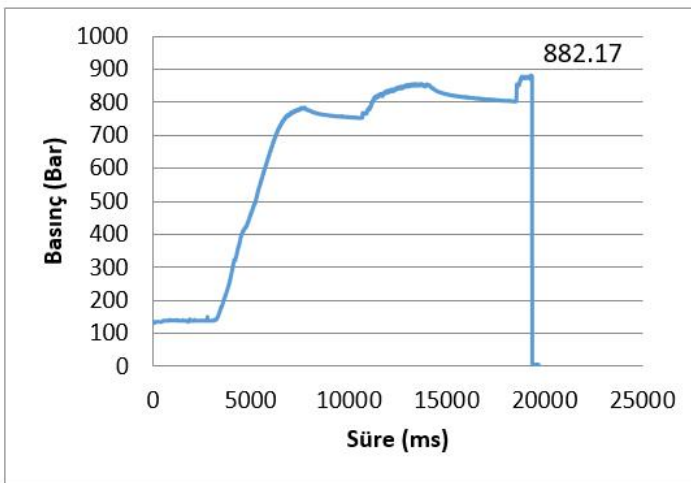
Şekil 5.29 7 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip



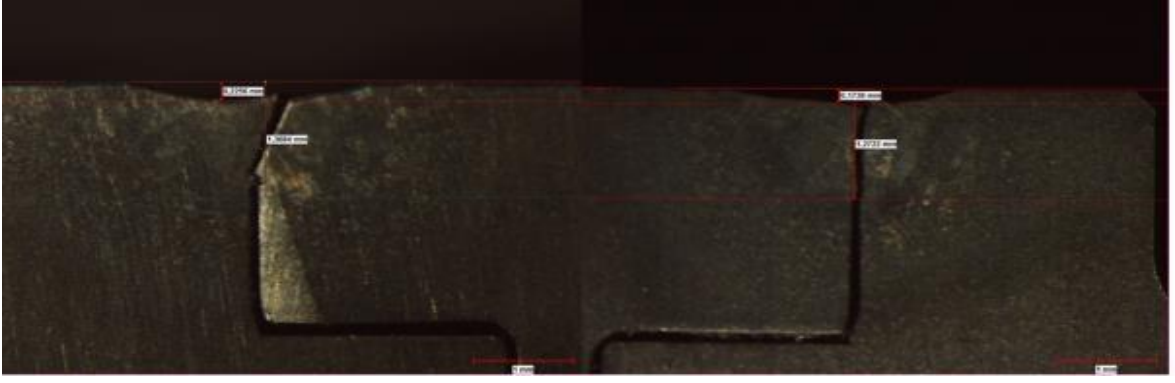
Şekil 5.30 8 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip



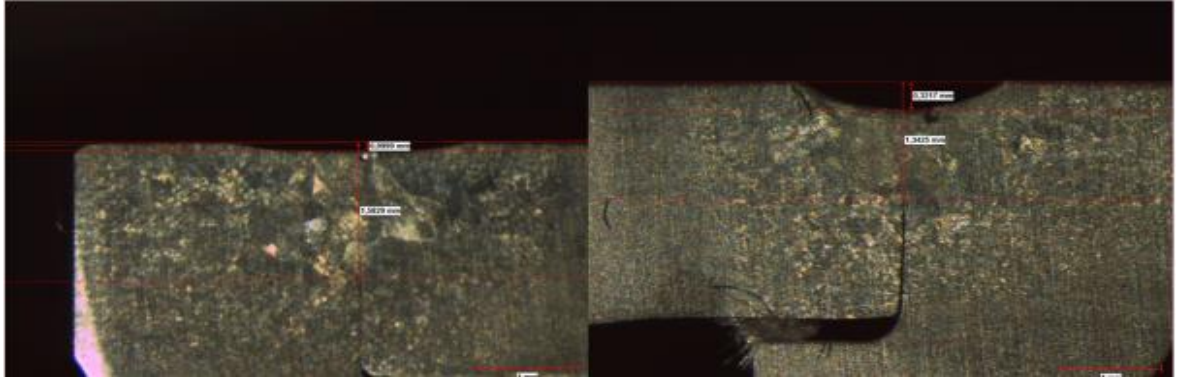
Şekil 5.31 9 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip



Şekil 5.32 10 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip



Şekil 5.33 Çizelge 5-3 ve Şekil 5.29 da belirtilen 7 numaralı basınçlı tüpün patlama yüzeyinden alınan numunelerin X-ray makro görüntüsü, kaynak bölgesi 2 (Kaynak nüfuziyeti 1.37 ile 1.27 mm arasında çevresel olarak değişiklik göstermektedir.)



Şekil 5.34 Çizelge 5-3 ve Şekil 5.29 da belirtilen 7 numaralı basınçlı tüpün patlama olmayan yüzeyinden alınan numunelerin X-ray makro görüntüsü, kaynak bölgesi 1 (Kaynak nüfuziyeti 1.58 ile 1.34 mm arasında çevresel olarak değişiklik göstermektedir.)

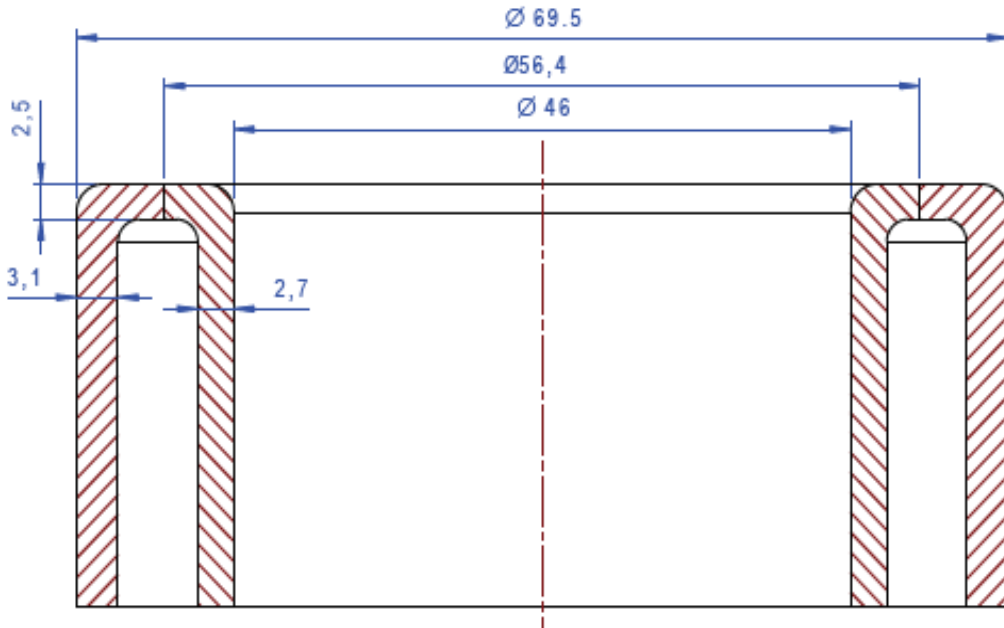
Şekil 5.33'te kaynak arayüzü hata modu incelendiğinde kaynağın zorlanmasındaki ana nedenlerden birinin basınçlı gazın iç ve dış silindirlerin yüzeyleri arasında bulunan boşluk olduğu değerlendirilmektedir. Bunun sonucu olarak yüzeyler arası boşluk, yüzeylerin kaynak bölgesinden yırtılmasını kolaylaştırdığı sonucuna ulaşılmaktadır. Özetle arada olan bir boşluk veya kaynağın tam nüfuziyetli olmayıp kısmi olması mekanik açıdan yırtılma bölgesi gerilim birikme noktası veya yüzeyi olarak değerlendirilebilir.

Bunun yanında Şekil 5.34'te belirtilen ve patlama olmayan yüzeyde ise iç ve dış silindir oturma yüzeyleri arasında iki silindirik parçanın montajı ve/veya kaynağı esnasında bir çarpılma meydana geldiği görülmektedir.

Bütün bu bahsi geçen sebeplerden ötürü alt ve üst kaynak arayüzlerindeki hem kaynak nüfuziyeti farklılıklarını ortadan kaldırmak; hem de tam nüfuziyetli bir kaynak arayüzü elde edebilmek için silindirlerin birbirlerine oturma yüzeylerinin iptal edilmesi ve tam anlamıyla alın kaynağına geçilmesinin uygun olacağı değerlendirilmiştir.

5.4. Alın Kaynak Arayüzlü İlk Kupon Denemesi ve Sonuçları

Alın kaynağı tasarım değişikliği yapmadan önce kaynak arayüzlerinde bulunan et kalınlığının azaltılması konusunu da değerlendirmek için önden tek adetlik bir parametre ve arayüz kaynak deneme çalışması yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında kaynak bölgesi tam anlamıyla alın kaynağı olacağından tek kupon olarak değerlendirilmiştir. EBW yeni alın kaynak arayüzü için kullanılan kaynak kupon geometrisi ve arayüz ölçüleri Şekil 5.35 de belirtildiği gibidir.



Şekil 5.35 Alın kaynaklı kupon denemesinde kullanılan kupon geometrisi ve temel kaynak arayüz ölçüleri

Kaynak kupon denemesinde parametre olarak daha önce bahsi geçen çalışmalar incelendiğinde; ışın akım değerinin 6.8 mA, ışın geriliminin 50 kV, ışın odaklama bobini akım değerinin 4.7 A, kaynak hızının 4 rpm, ışın akımı artırım açısının 5°, ışın akımı azaltım açısının 100° ve kaynak açısının 370° olarak alınmasına karar verilmiştir.

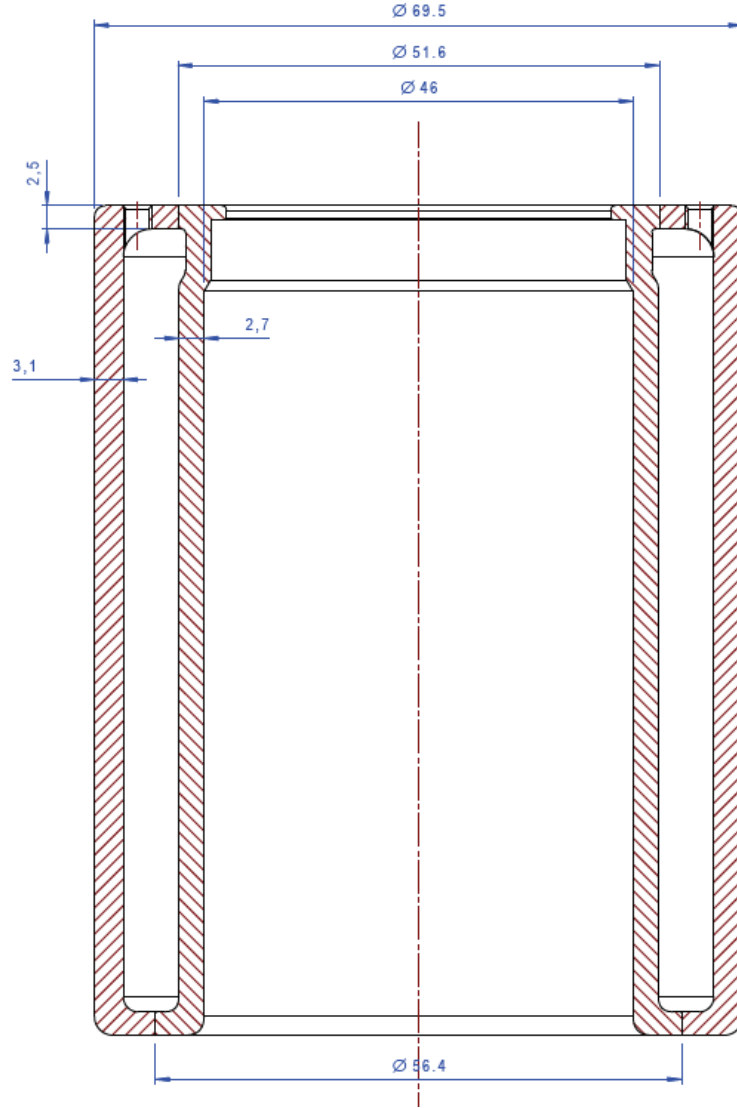


Şekil 5.36 Tam nüfuziyetli alın kaynaklı 2.5 mm kaynak arayüzü cidar kalınlığına sahip Şekil 5.35 de temel ölçüleri belirtilen kuponun görüntüsü

Şekil 5.36'da görüldüğü üzere, belirlenen parametrelerle 2.5 mm tam nüfuziyetli alın kaynağı elde edilmiştir. Bu bağlamda elde edilen kaynak arayüzü sonucunda tüp geometrisi yeni kaynak arayüzüne göre revize edilmiş ve Şekil 5.37'de belirtildiği gibi yeni basınçlı tüp geometrisinin temel ölçüleri bulunmaktadır.

5.5. Alın Kaynaklı Yeni Tüp Geometrisi – Statik Analiz ve Değerlendirme

Bu bölümde nihai kupon üretimi, sızdırmazlık ve patlatma testi yapmadan önce basınçlı tüp nihai geometrisi patlama modu hakkında testlerden önce bilgi sahibi olmak adına yeni geometri tek parça ve gaz giriş-çıkış delikleri olmadan Solidworks Simulation Workbench kullanılarak statik mukavemet analizi yapılmıştır. Bu çalışmada bahsi geçen analizin patlama performansını doğrulama gibi bir amacı bulunmamaktadır. Patlama modu hakkında testler öncesi fikir sağlaması açısından yapılmıştır. Bu bağlamda analize girdi olarak kullanılan ve yapılan varsayımlar aşağıda belirtildiği gibidir:



Şekil 5.37 Alın kaynağına uygun olarak düzenlenmiş tüp geometrisi

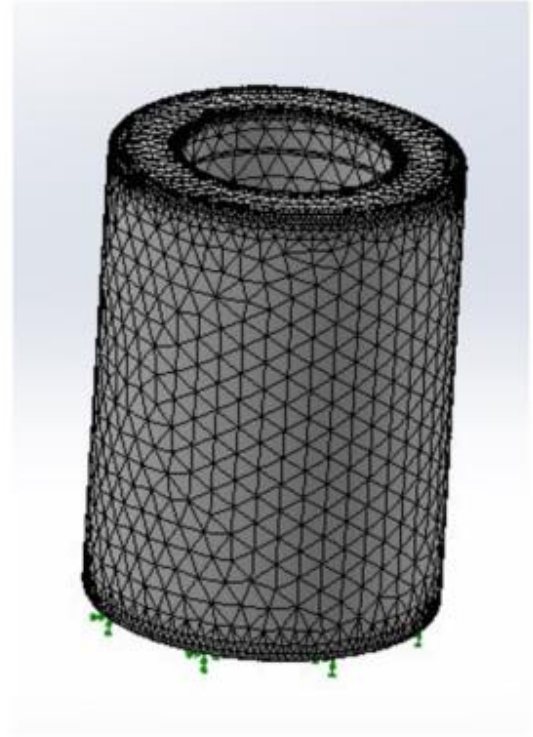
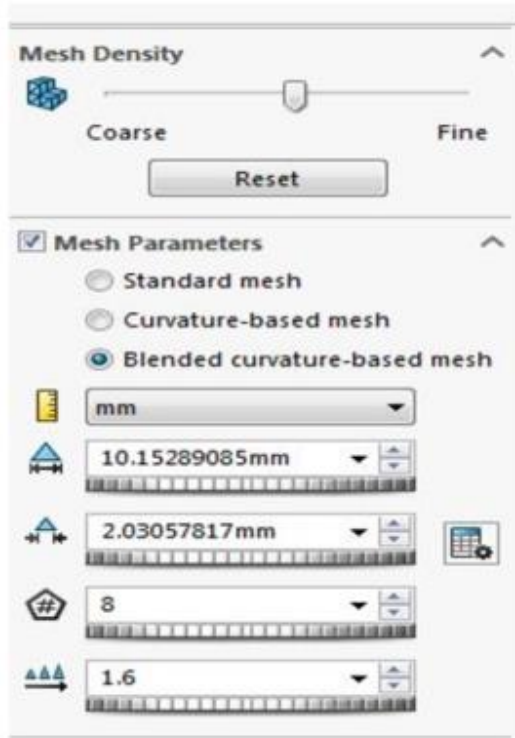
1. İlk patlatma denemelerinde kullanılan 6.5 mA ışın akım değerine sahip tüplerde dış silindir et kalınlığı üretim hatasından dolayı radyal boylamasına yarılan tüplerde dahi patlama basınç değeri 900 bar'a yakın olduğundan analiz yapılırken tüpün kaynak arayüzü cidar kalınlıkları değerlendirme kriteri olarak alınmamıştır. Sade ve anlamlı bir analiz çıktısı elde edilmesi açısından analiz modelinde basınçlı tüpün kaynak arayüzleri bulunan üst ve alt kısımları sabitlenmiştir.
2. Analiz modellemesi yapılırken kullanılan malzeme bilgileri Çizelge 5-4'te belirtildiği gibidir [29]. Bunun yanında YS ve UTS gerilim değerleri için;

malzeme sertifikasında bulunan ve Şekil 1.10 ve Şekil 1.11'de belirtilen değerlere göre ortalama değerler alınarak kullanılmıştır.

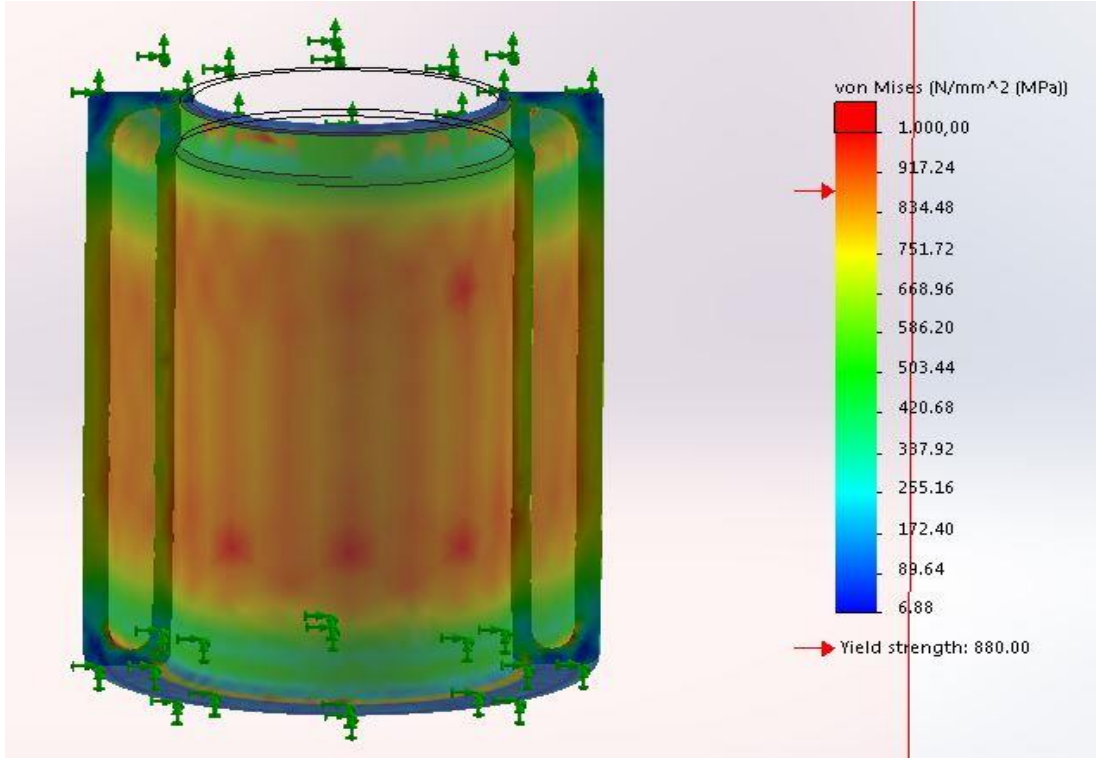
Çizelge 5-4 Basıncı tüp statik analiz malzeme özellikleri

| Malzeme Mekanik Özellikleri | |
|-----------------------------|-----------|
| UTS | 960 MPa |
| YS | 880 MPa |
| Elastisite Modülü | 113.8 GPa |
| Poison Oranı | 0.342 |
| Basma Akma Gerilimi | 970 MPa |

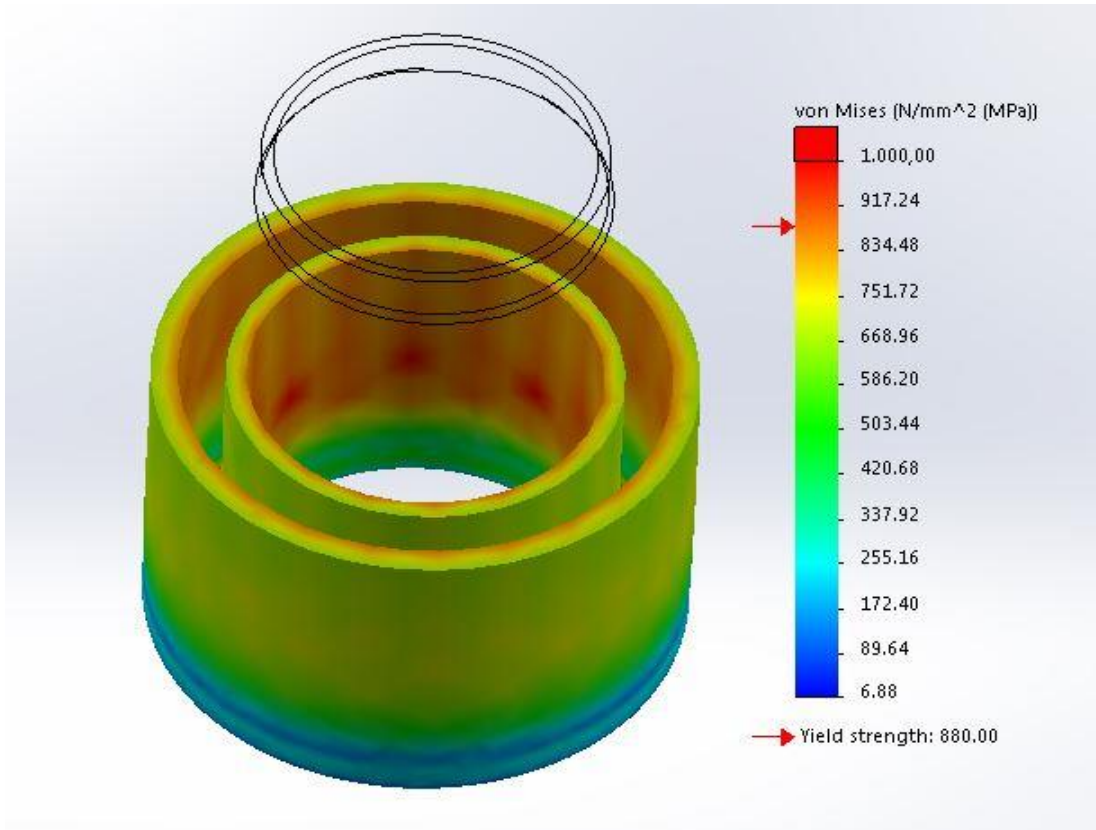
- Analiz modellemesinde tüp iç yüzeylere 100 MPa'lık basınç değerinde yük uygulanmıştır.
- Analiz yapılırken kullanılan örgü tipi, programın geometriye uygun olarak sunduğu karışık üçgen tipli örgülerdir. Ölçüleri 2 ile 10 mm arasında değişecek ve programın önerdiği şekliyle analiz koşturulmuştur. (Bkz. Şekil 5.38)



Şekil 5.38 Analiz örgü tipi, büyüklüğü ve yapısı



Şekil 5.39 1000 bar basınç değerinde iç silindirik kısımda oluşan yükler



Şekil 5.40 1000 bar basınç değerinde iç silindirik kısımda oluşan yüklerin kesit görüntüsü

Şekil 5.39 ve Şekil 5.40'de görüldüğü üzere 900 bar tüp iç basınç değerinin üzerinde yani 1000 barlık uygulanan yük altında; basınçlı tüp hata modunun iç silindirik kısımdan olabileceği görülmektedir. Yani bu durumda tüp iç cidar kalınlığından radyal boylamasına açılıp patlaması beklenmektedir. Mekanik tasarım sistem gereksinimleri göz önünde bulundurulduğunda; basınçlı tüpün içten patlaması kullanıcı zararlarını azaltmak adına istenilen bir durumdur.

5.6. Nihai Kupon Denemeleri-Veri Analizi

İlk kupon denemelerinde çıkarılan ve alın kaynaklı kupon denemesinde kullanılan parametreler göz önünde bulundurulduğunda; nihai kupon denemeleri, deney tasarımı yaklaşımı kullanılarak 2K tam faktöriyel, çift tekrarlı, orta nokta hesaba katılarak yapılmıştır. Burada amaç ilgilenilen çözüm kümesinde EBW kaynağında etkin olduğunu düşündüğümüz parametrelerin karakterizasyonudur. Buradan elde edilen bilgi çerçevesinde ileride benzer malzeme ve et kalınlıklarına sahip bir üründe EBW kaynağı kullanılması durumunda; elde edilen ilişkinin kullanılması ve deney sayısının daha az tutularak etkin ve doğru sonuca ulaşılması hedeflenmektedir.

Bu bağlamda tasarlanacak olan deney modellemesinde iki ana girdi parametresi olarak kaynak nüfuziyetinde etkisi olduğu belirlenen, ışın akımı ve kaynak hızı seçilmiştir.

Deney tasarımına geçerken Şekil 5.35'te belirtilen mevcut kupon geometrisine uygulanacak olan girdi parametrelerinin alt ve üst limitlerin belirlenmesi gerekmektedir.

Belirlenen alt-üst limitler ve seviyeleri Çizelge 5-5'te verilmiştir. 2K tam faktöriyel, çift tekrarlı, orta nokta ile deney tasarımı ile ilgili deney matrisi ve kaynak nüfuziyet miktarları Çizelge 5-6'da verilmiştir. Diğer parametrelerden, kaynak odası vakum miktarı 10^{-4} Torr, ışın odaklama bobini akım değeri 4.7 A, ışın akımı arttırım açısı 5° , ışın akımı azaltım açısı 100° ve kaynak açısı 370° olarak daha önce belirlendiği üzere sabit tutulmuştur.

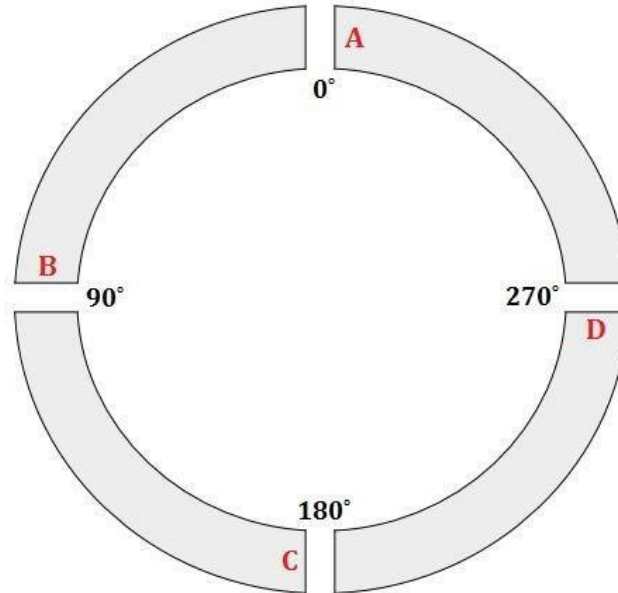
Bunun yanında alın kaynaklı tasarıma geçilirken kaynak arayüz çap geçişleri kaynak esnasında oluşacak olan yüzey çöküntü miktarını en aza indirmek ve kaynak öncesi iki parçanın mekanik olarak birbirini sıkı bir şekilde tutmasını sağlaması açısından, kaynak esnasında oluşacak olan kaynak düzensizliklerini önlemek için yapılan titanyum kaynak yüzey temizliği işleminden sonra sıkı geçme

olacak şekilde toleranslandırılmıştır. Arayüzlerde kullanılan talaşlı imalat sonrası kaynak arayüzlerinde kabul edilen tolerans değerleri iç silindirik parçasında u6 iken; dış silindirik parçasında H7 olarak belirlenmiş ve üretimler bu kabul kriterine göre yapılmıştır. Bununla beraber iç ve dış silindirik kısımların kaynak arayüzleri sıkı geçme toleransı ile toleranslandırıldığından; iç kısmın, dış kısma geçirme işleminden önce 30 sn boyunca sıvı azota daldırılarak termal büzüşmesi sağlanarak montaj işlemleri yapılması gerekliliği doğmuştur.

Çizelge 5-5 Deney tasarımı için belirlenen parametre seviyeleri

| Parametreler | Parametre Seviyeleri | |
|-------------------|----------------------|------|
| | Min. | Max. |
| Işın Akımı (mA) | 4,6 | 6,8 |
| Kaynak Hızı (rpm) | 4 | 4,6 |

Kupon bazından kaynak nüfuziyet miktarları değerlendirmeye alınırken her bir kupondan Şekil 5.41'de belirtildiği üzere 90° açılarla alınan dilimlere X-ray muayenesi yapılmış olup; veri analizinde değerlendirmeye her kupon için 4 adet kesitin ortalaması alınarak değerlendirilmeye katılmıştır.

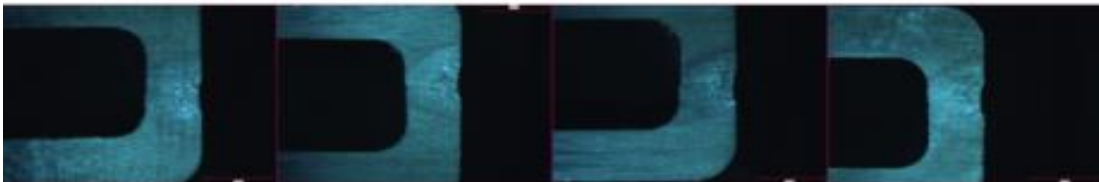


Şekil 5.41 Kupon üzeri alınan kesit bölgeleri

Çizelge 5-6 2K tam faktöriyel, çift tekrarlı, orta nokta ile deney tasarımı kupon matrisi ve sonuçlar

| Kaynak Kupon No | Değişkenler | | Çıktılar | | | | |
|-----------------|-----------------|-------------------|---------------------------------|---|-------|-------|-------|
| | Işın Akımı (mA) | Kaynak Hızı (rpm) | Ortalama Kaynak Nüfuziyeti (mm) | 4 Kesitten Alınan Kaynak Nüfuziyet Değerleri (mm) | | | |
| | | | | A | B | C | D |
| 1 | 4.6 | 4.0 | 1.41 | 1.414 | 1.372 | 1.420 | 1.476 |
| 2 | 6.8 | 4.0 | 2.54 | 2.543 | 2.575 | 2.527 | 2.559 |
| 3 | 4.6 | 4.6 | 1.40 | 1.398 | 1.396 | 1.364 | 1.380 |
| 4 | 6.8 | 4.6 | 2.51 | 2.511 | 2.519 | 2.503 | 2.511 |
| 5 | 4.6 | 4.0 | 1.39 | 1.394 | 1.332 | 1.404 | 1.492 |
| 6 | 6.8 | 4.0 | 2.58 | 2.581 | 2.535 | 2.567 | 2.623 |
| 7 | 4.6 | 4.6 | 1.41 | 1.412 | 1.468 | 1.508 | 1.348 |
| 8 | 6.8 | 4.6 | 2.52 | 2.517 | 2.479 | 2.511 | 2.527 |
| 9 | 5.7 | 4.3 | 2.55 | 2.551 | 2.487 | 2.583 | 2.567 |
| 10 | 5.7 | 4.3 | 2.38 | 2.380 | 2.374 | 2.382 | 2.455 |

Ortalama kaynak nüfuziyet miktarları hesaplanırken, 4 verinin ortalamasından elde edilen bu değerlerde, 2.5 mm'den büyük değerlerin elde edilmesi, bu ölçüde +0.15/0 mm aralığında tolerans değeri olmasından kaynaklanmaktadır ve bu değer talaşlı imalat esnasında üretim toleransı olarak kullanılmak üzere tanımlanmıştır. Çizelge 5-6'da belirtilen kuponlara ait X-ray muayenesi makro görüntüleri, Şekil 5.42, Şekil 5.43, Şekil 5.44, Şekil 5.45, Şekil 5.46, Şekil 5.47, Şekil 5.48, Şekil 5.49, Şekil 5.50 ve Şekil 5.51'de bulunmaktadır.



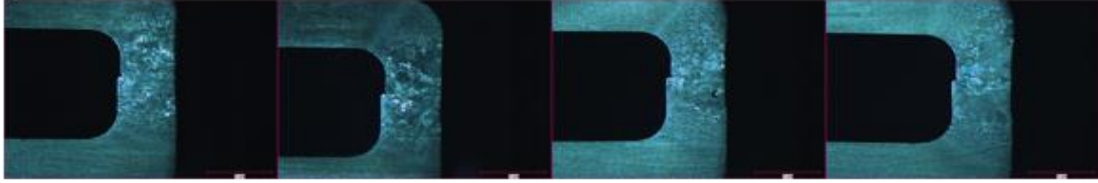
Şekil 5.42 Çizelge 5-6 Kupon 1 sırasıyla A,B,C ve D kesitleri X-ray makro görüntüleri (Ortalama KN: 1.41)



Şekil 5.43 Çizelge 5-6 Kupon 2 sırasıyla A,B,C ve D kesitleri X-ray makro görüntüleri (Ortalama KN: 2.54)



Şekil 5.44Çizelge 5-6 Kupon 3 sırasıyla A,B,C ve D kesitleri X-ray makro görüntüleri (Ortalama KN: 1.40)



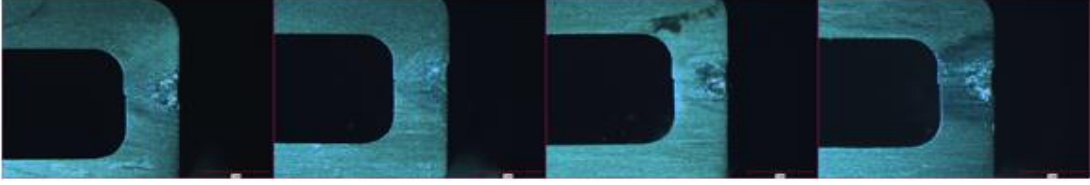
Şekil 5.45 Çizelge 5-6 Kupon 4 sırasıyla A,B,C ve D kesitleri X-ray makro görüntüleri (Ortalama KN: 2.51)



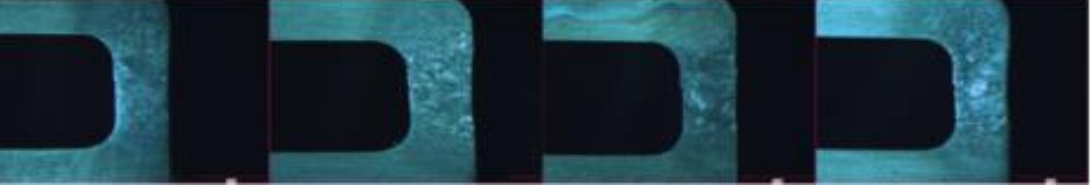
Şekil 5.46 Çizelge 5-6 Kupon 5 sırasıyla A,B,C ve D kesitleri X-ray makro görüntüleri (Ortalama KN: 1.39)



Şekil 5.47 Çizelge 5-6 Kupon 6 sırasıyla A,B,C ve D kesitleri X-ray makro görüntüleri (Ortalama KN: 2.58)



Şekil 5.48 Çizelge 5-6 Kupon 7 sırasıyla A,B,C ve D kesitleri X-ray makro görüntüleri (Ortalama KN: 1.41)



Şekil 5.49 Çizelge 5-6 Kupon 8 sırasıyla A,B,C ve D kesitleri X-ray makro görüntüleri (Ortalama KN: 2.52)



Şekil 5.50 Çizelge 5-6 Kupon 9 sırasıyla A,B,C ve D kesitleri X-ray makro görüntüleri (Ortalama KN: 2.55)



Şekil 5.51 Çizelge 5-6 Kupon 10 sırasıyla A,B,C ve D kesitleri X-ray makro görüntüleri (Ortalama KN: 2.38)

Veriler Minitab programı ile analiz edilmiştir. Her bir girdi parametresinin çalışılan çözüm aralığı için maksimum ve minimum olmak üzere 2 düzeyi bulunmaktadır. Bunun yanında tekrarlanabilirliği görmek adına testler çift tekrarlı olarak yapılmıştır.

Deney kurgusunda orta noktaların hesaba katılmasının nedeni Şekil 5.21’de görüldüğü üzere daha önceden yapılan deneylerde, ışın akımının, kaynak nüfuziyetinin üzerinde ikinci dereceden bir etkisinin olmasından kaynaklanmaktadır.

Modeli çalıştırıp sonuç almadan belirlenen bir diğer parametre ise güvenilirlik seviyesidir. Minitab da baz olarak sunulan ve istatistiksel analizlerde sıkça kullanılan çift taraflı güvenilirlik seviyesi %95 olarak belirlenmiştir. Bu durum analiz çıktılarında p-Value değeri 0.05 den büyük olan durumlarda hipotezi reddetmemiz; yani ilgili girdinin çıktı üzerinde bir etkisi olmadığını veya güvenilirlik seviyesinin dışında olduğunu ve ilgili girdinin modelden çıkarıldıktan sonra analize devam etmemiz gerektiğini belirtmektedir.

Factorial Regression: Kaynak Nüfuziyeti (mm) versus Işın ...), CenterPt

Analysis of Variance

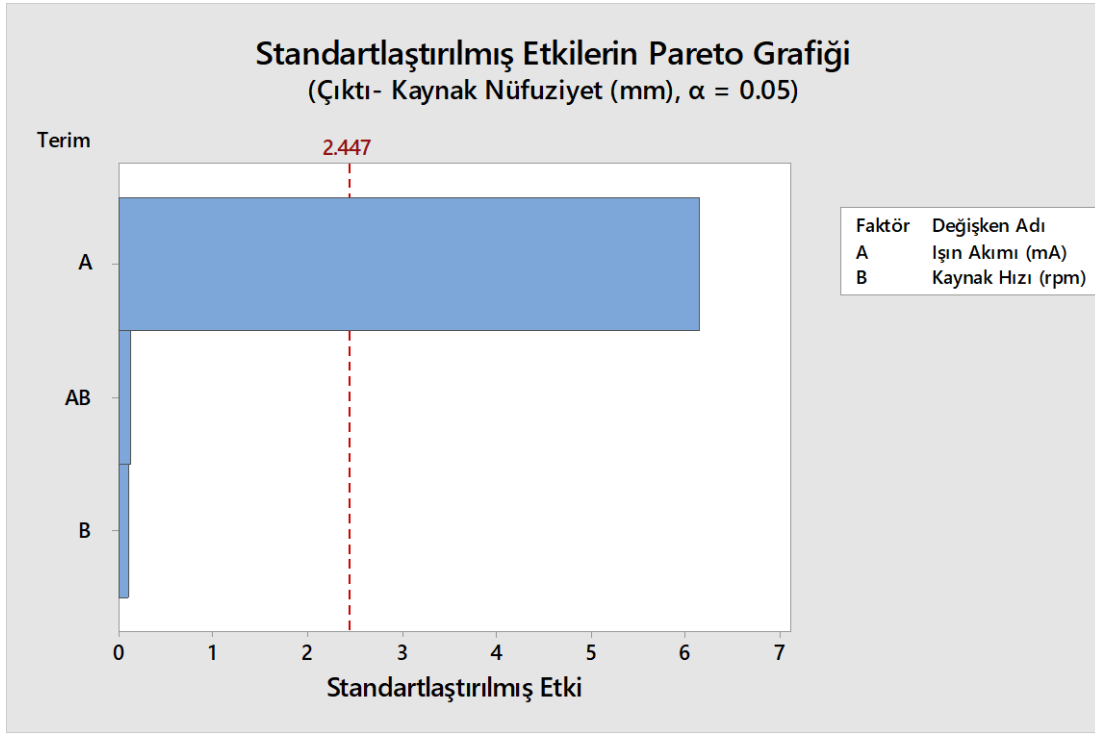
| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|-----------------------------------|----|---------|---------|---------|---------|
| Model | 4 | 2.97054 | 0.74264 | 238.79 | 0.000 |
| Linear | 2 | 2.57725 | 1.28863 | 414.35 | 0.000 |
| Işın Akımı (mA) | 1 | 2.57645 | 2.57645 | 828.44 | 0.000 |
| Kaynak Hızı (rpm) | 1 | 0.00080 | 0.00080 | 0.26 | 0.634 |
| 2-Way Interactions | 1 | 0.00125 | 0.00125 | 0.40 | 0.554 |
| Işın Akımı (mA)*Kaynak Hızı (rpm) | 1 | 0.00125 | 0.00125 | 0.40 | 0.554 |
| Curvature | 1 | 0.39204 | 0.39204 | 126.06 | 0.000 |
| Error | 5 | 0.01555 | 0.00311 | | |
| Total | 9 | 2.98609 | | | |

Model Summary

| S | R-sq | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|-----------|--------|-----------|------------|
| 0.0557674 | 99.48% | 99.06% | 97.92% |

Şekil 5.52 Tam faktöriyel model ilk çıktı görüntüsü

Şekil 5.52'de görüldüğü üzere model çıktısı; yani kaynak nüfuziyeti üzerinde etkili olan parametrelerle ilişkisinde kesinlikle eğrisellik vardır. Bu durum curvature p-value değerinin 0 olmasından anlaşılmaktadır. Bunun yanında bu eğrisellik ışın akımı ve kaynak hızı ikili etkisinden kaynaklanmadığı ışın akımı*kaynak hızı p-value değerinin 0.05'den büyük olmasından anlaşılmaktadır. Buna rağmen faktörlerin p-value değerleri çok küçük, yani model çıktısı üzerinde etkileri var; fakat ağırlık katsayıları düşük olduğundan R-sq değeri %99.48 olarak elde edilmiştir. Bu değer bu seviyede olması çalışılan çözüm aralığı ve çalışılan faktör seviyelerine göre iyi bir model elde edilebileceğinin kanıtıdır. İkili etkileşimin yanı sıra kaynak hızının da kaynak nüfuziyet çıktısı üzerinde etkisinin olmadığı veya az olduğu bilgisi Şekil 5.52'de olduğu gibi ikili etkiyle beraber Şekil 5.53'de belirtilen Pareto grafiğinde de görülmektedir.



Şekil 5.53 Standardize edilmiş etkilerin Pareto Grafiği

Factorial Regression: Kaynak Nüfuziyet (mm) versus Işın ...), CenterPt

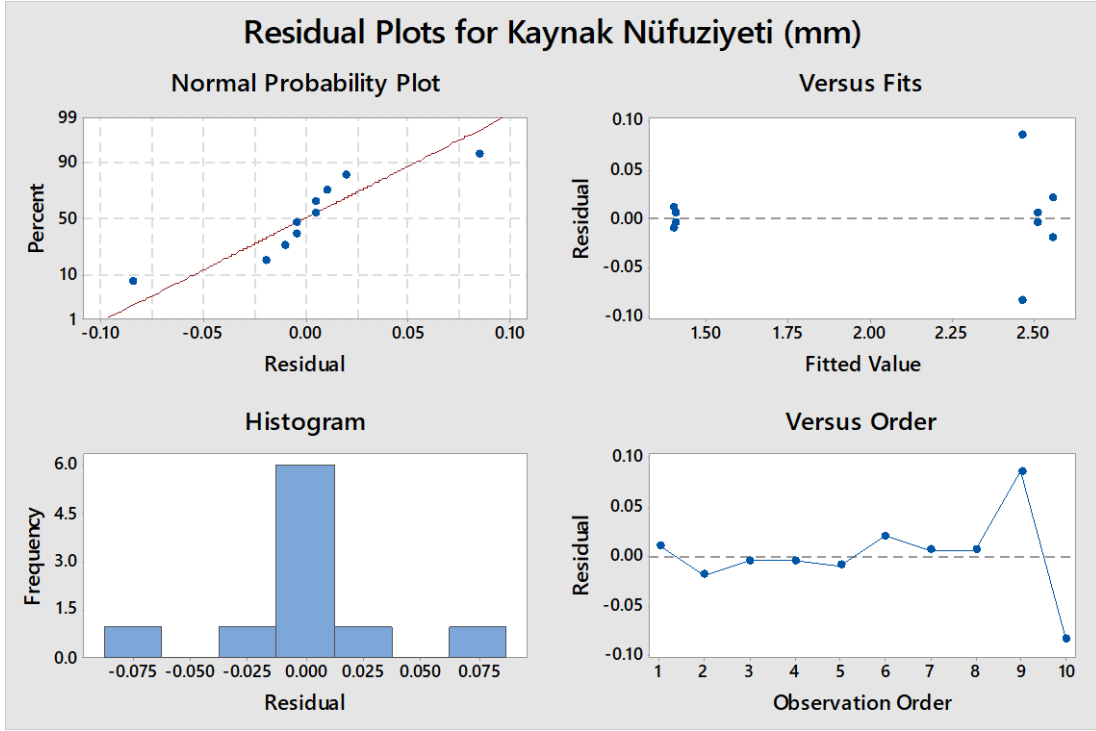
Analysis of Variance

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|-----------------|----|---------|---------|---------|---------|
| Model | 2 | 2.96849 | 1.48425 | 590.32 | 0.000 |
| Linear | 1 | 2.57645 | 2.57645 | 1024.72 | 0.000 |
| Işın Akımı (mA) | 1 | 2.57645 | 2.57645 | 1024.72 | 0.000 |
| Curvature | 1 | 0.39204 | 0.39204 | 155.92 | 0.000 |
| Error | 7 | 0.01760 | 0.00251 | | |
| Lack-of-Fit | 2 | 0.00205 | 0.00103 | 0.33 | 0.734 |
| Pure Error | 5 | 0.01555 | 0.00311 | | |
| Total | 9 | 2.98609 | | | |

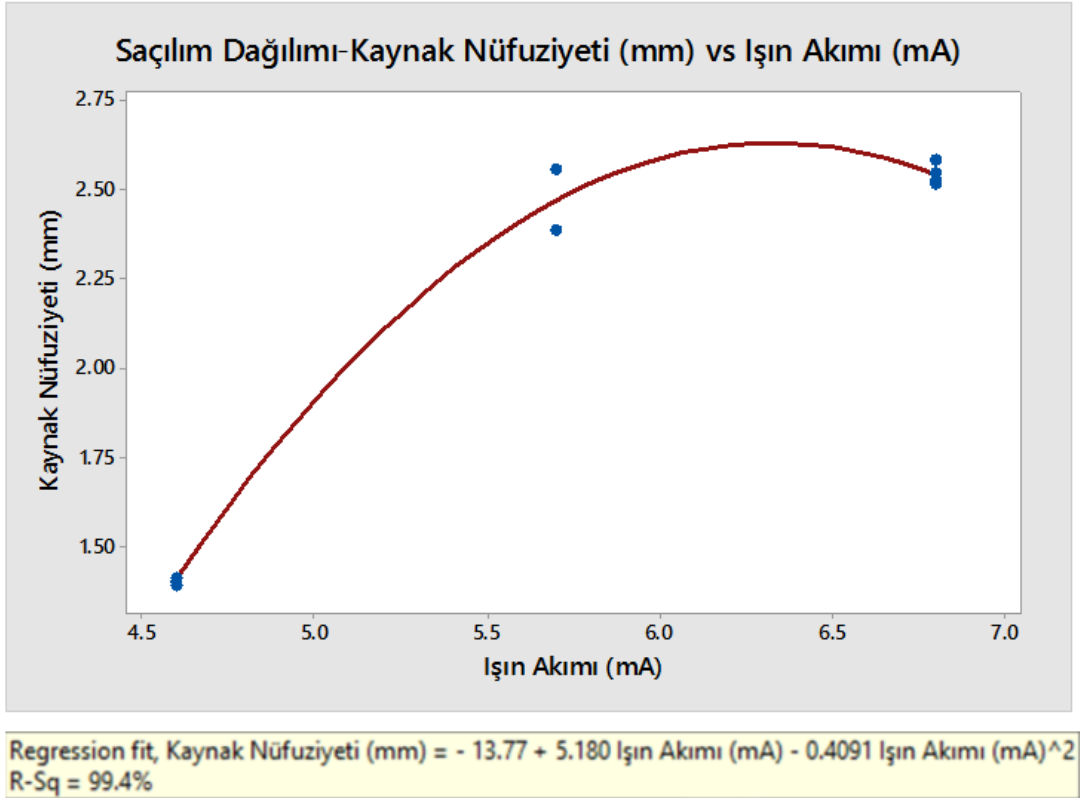
Model Summary

| S | R-sq | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|-----------|--------|-----------|------------|
| 0.0501427 | 99.41% | 99.24% | 97.88% |

Şekil 5.54 Sadeleştirilmiş nihai tam faktöriyel modelin çıktı görüntüsü



Şekil 5.55 Model varsayımlarının doğrulanması



Şekil 5.56 Kaynak nüfuziyeti nihai 2. dereceden regresyon modeli

Şekil 5.54'de belirtilen nihai model R-sq, ikili etki ve kaynak hızı çıkarılmasına rağmen bu değeri %99.41 değerinde kalması; ışın akımı değerinin kaynak nüfuziyet çıktısı üzerinde etkisinin baskın olduğunu göstermektedir. Şekil 5.54 ve Şekil 5.56'daki elde edilen Rsq değeri, ilk çıktı verilerinin analizinde elde edilen ve Şekil 5.21'de belirtilen değerle karşılaştırıldığında %72.8 olan değer %99.4 değerine iyileştirilmiştir.

Bunun yanında Şekil 5.55'te model kurulurken yapılan varsayımlar artık analizi ile kontrol edilmiştir. Şekil 5.55'te bulunan grafiklere göre artıklar normal dağılmaktadır ve artıklar türetilen model etrafında eşit varyanslı dağılmaktadır denilebilir. Varsayımlar doğru olarak kabul edilmektedir.

Bu tez çalışmasında EBW kaynağı ile yapılan tüm değerlendirmeler neticesinde nihai kaynak parametre seti olarak Çizelge 5-7'de belirtilen parametreler kullanılmıştır.

Çizelge 5-7 Nihai EBW Kaynağı Parametre Seti

| Işın Odaklama Bobin Akımı (A) | Işın Akımı (mA) | Işın Gerilimi (kV) | Kaynak Hızı (rpm) | Işın Akımı Arttırım Açısı (°) | Işın Akımı Azaltım Açısı (°) | Kaynak Açısı (°) |
|-------------------------------|-----------------|--------------------|-------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------|
| 4.7 | 6.8 | 50 | 4 | 5 | 100 | 370 |

5.7. Nihai Sızdırmazlık ve Patlatma Testleri Sonuçları ve Değerlendirilmesi

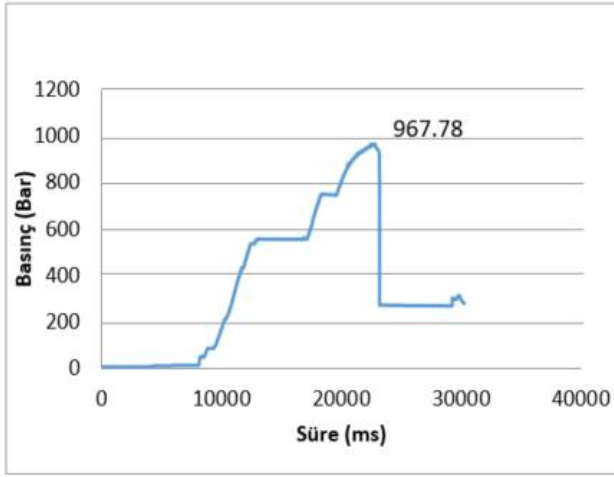
Bu bölümde 5.6 numaralı başlık altında belirtilen nihai kupon verilerinin analizi sonucunda elde edilen ve Çizelge 5-7'de belirtilen nihai EBW parametre seti ile basınçlı tüpün sızdırmazlık ve patlama performansı açısından durumunun test edilmesi amaçlanmıştır. Sızdırmazlık ve patlatma testleri için daha önce 4 numaralı ana başlık altında yer alan sızdırmazlık ve patlatma test prosedürleri izlenmiştir.

Basınçlı tüplerin her biri önce sızdırmazlık testine ardından da patlatma testine tabii tutulmuştur. Nihai testlerde kullanılan prototip sayısı 5 adettir. Basınçlı tüp nihai patlatma test sonuçları ve hata modları Çizelge 5-8'de belirtilmiş olup; Şekil 5.57, Şekil 5.58, Şekil 5.59, Şekil 5.60 ve Şekil 5.61'de basınç-zaman grafikleri ve basınçlı tüplerin patladıktan sonraki durumları bulunmaktadır.

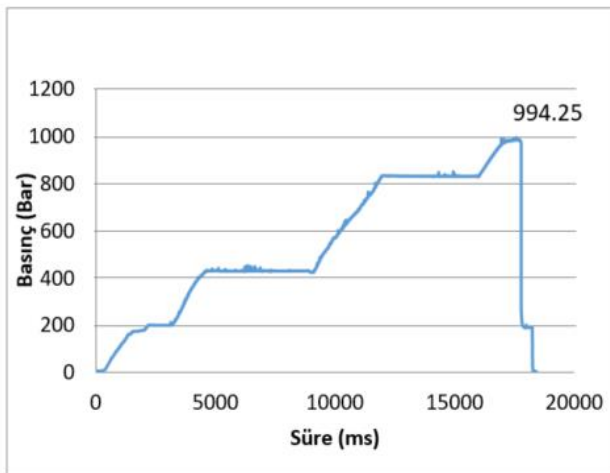
Basıncı tüp patlatma testi öncesi He sızdırmazlık test sonuçları Çizelge 5-9'da belirtilmiş olup; Şekil 5.62, Şekil 5.63, Şekil 5.64, Şekil 5.65, Şekil 5.66 ve Şekil 5.67'de ilgili testlerin sızdırmazlık-zaman grafikleri bulunmaktadır.

Çizelge 5-8 Basıncı tüp nihai patlatma test sonuçları ve hata modu

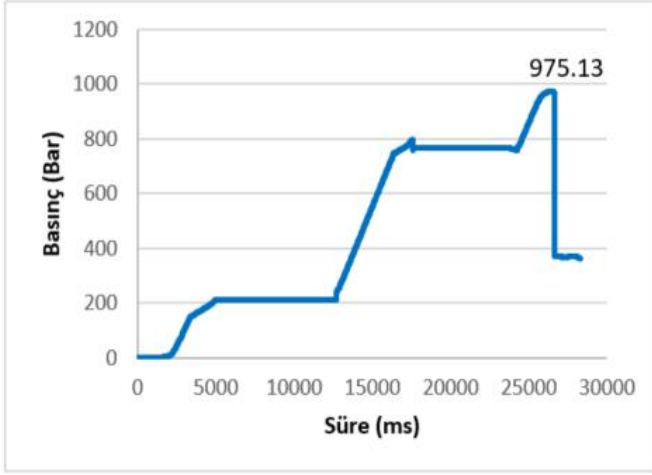
| Tüp No | Patlama Basıncı (bar) | Hata Modu |
|--------|-----------------------|---|
| 1 | 968 | Basıncı tüp iç silindirik kısmından boylamsal olarak yarılmıştır. |
| 2 | 994 | |
| 3 | 975 | |
| 4 | 1046 | |
| 5 | 960 | |



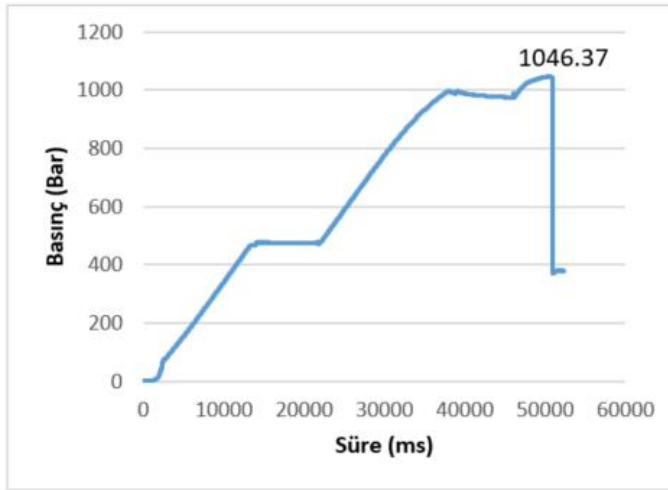
Şekil 5.57 Çizelge 5-8 1 numaralı basıncı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip



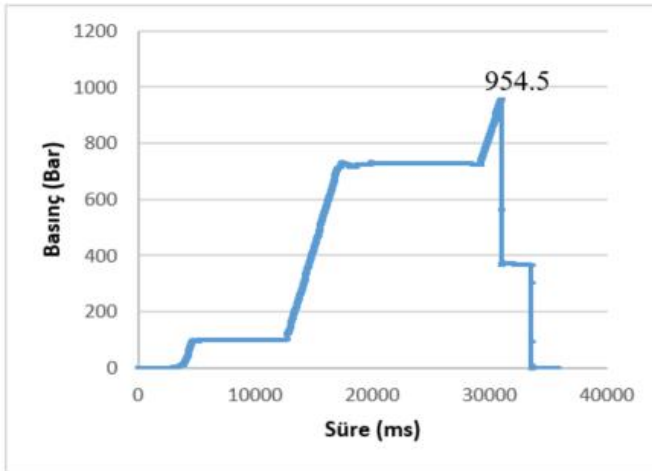
Şekil 5.58 Çizelge 5-8 2 numaralı basıncı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip



Şekil 5.59 Çizelge 5-8 3 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip



Şekil 5.60 Çizelge 5-8 4 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip

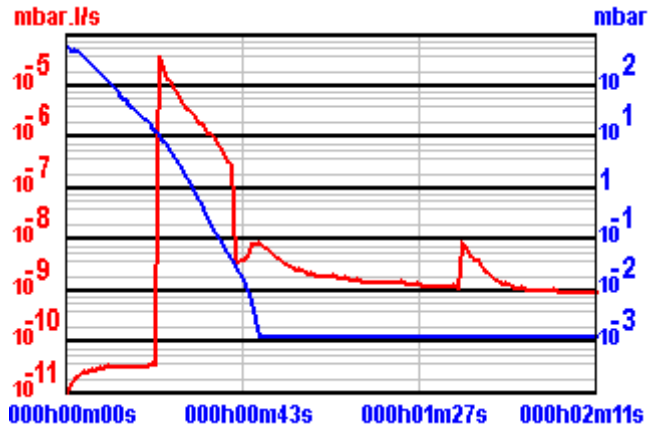


Şekil 5.61 Çizelge 5-8 5 numaralı basınçlı tüpün patlama basıncı-zaman grafiği ve prototip

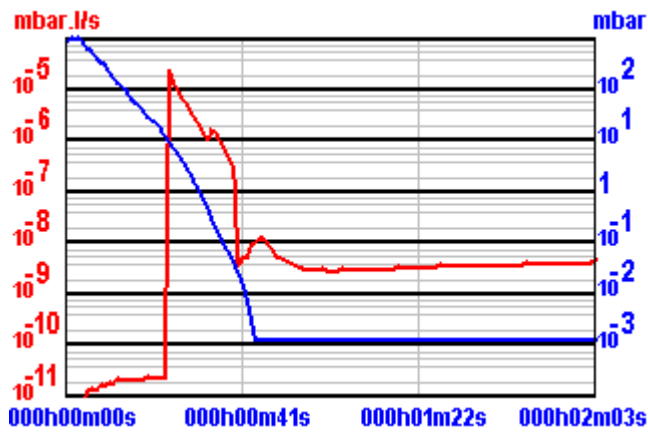
Çizelge 5-9 Basıncılı tüp nihai sızdırmazlık test sonuçları

| Tüp No | He Sızdırmazlık Değeri ($\frac{\text{mbar.lt}}{\text{s}}$) | Test Süresi (sn) |
|--------|---|---------------------|
| 1 | 3.5×10^{-9} | ~120 |
| 2 | 9.4×10^{-10} | |
| 3 | 7.9×10^{-10} | |
| 4 | 3.5×10^{-9} | |
| 5 | 8.2×10^{-10} | |

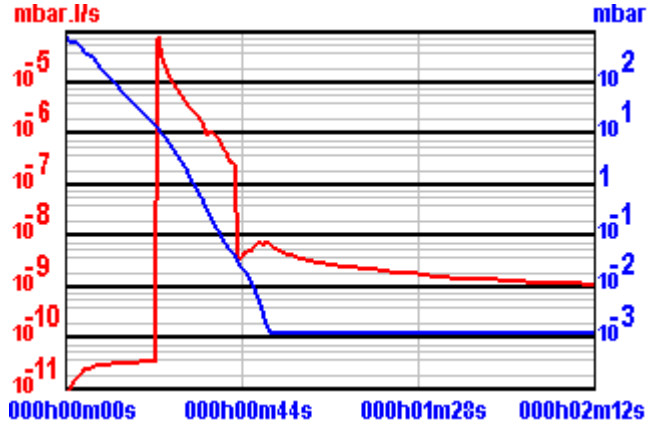
Sızdırmazlık testlerinde önce sızdırmazlık testi vakum odası tek başına test edilmiştir ve elde edilen He kaçak seviyesi değeri $3.2 \times 10^{-10} \frac{\text{mbar.lt}}{\text{s}}$ 'dir.



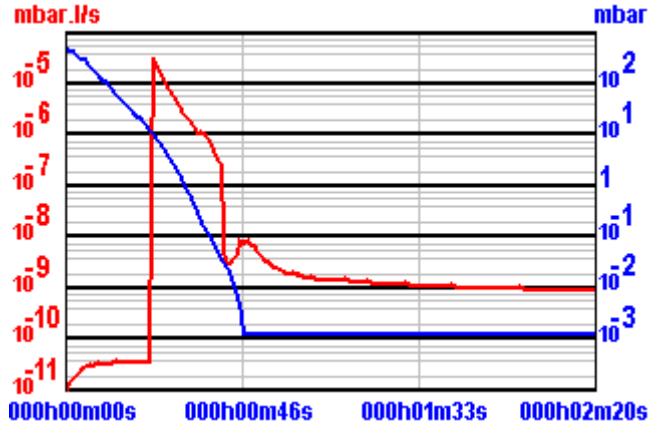
Şekil 5.62 Vakum odası He kaçak seviyesi, $3.2 \times 10^{-10} \frac{\text{mbar.lt}}{\text{s}}$



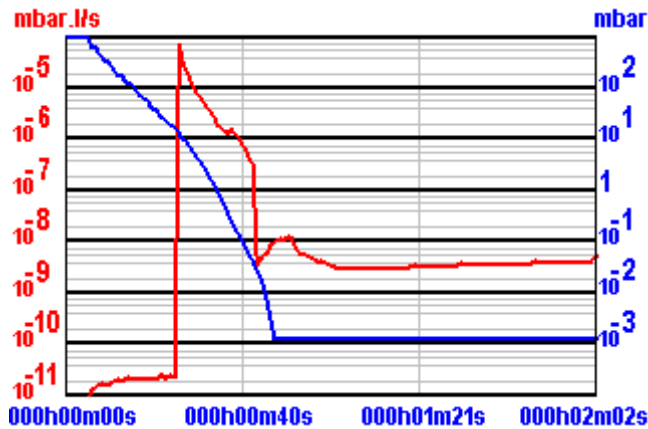
Şekil 5.63 Çizelge 5-9 1 numaralı basınçlı tüp He kaçak seviyesi, $3.5 \times 10^{-9} \frac{\text{mbar.lt}}{\text{s}}$



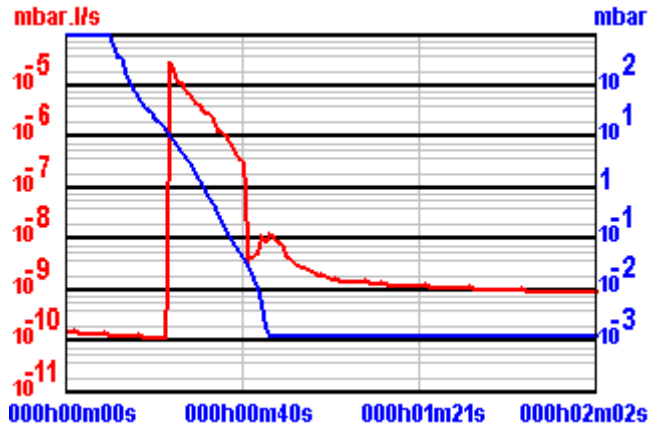
Şekil 5.64 Çizelge 5-9 2 numaralı basınçlı tüp He kaçak seviyesi, $9.4 \times 10^{-10} \frac{\text{mbar.lt}}{\text{s}}$



Şekil 5.65 Çizelge 5-9 3 numaralı basınçlı tüp He kaçak seviyesi, $7.9 \times 10^{-10} \frac{\text{mbar.lt}}{\text{s}}$



Şekil 5.66 Çizelge 5-9 4 numaralı basınçlı tüp He kaçak seviyesi, $3.5 \times 10^{-9} \frac{\text{mbar.lt}}{\text{s}}$



Şekil 5.67 Çizelge 5-9 4 numaralı basınçlı tüp He kaçak seviyesi, $8.2 \times 10^{-10} \frac{\text{mbar.lt}}{\text{s}}$

Çizelge 5-10 Helyum cinsinden ASTM F2391-05 standardına göre sızdırmazlık sınıflandırması

| ASTM F2391-05 Standardı Helyum Kaçak Seviyesi Sınıflandırması | | |
|---|----------------------|------------|
| Large Leaks | $10^{-1} - 10^{-4}$ | atm.cc/sec |
| Moderate Leaks | $10^{-4} - 10^{-6}$ | |
| Fine Leaks | $10^{-6} - 10^{-8}$ | |
| Ultra-Fine Leak | $10^{-8} - 10^{-10}$ | |

Çizelge 5-8 ve Çizelge 5-9'da belirtilen patlatma ve sızdırmazlık sonuçları incelediğinde aşağıda belirtilen sonuçlara varılmıştır:

1. EBW parametre çalışması kapsamında kuponlardan ve veri analiziyle elde edilen sonuca istinaden belirlenen kaynak parametreleri ve alın kaynak arayüzlü yeni kaynak arayüzü tasarımı ile bu çalışmanın amaçlarından biri olan en az 900 bar patlama basıncına ve aynı hata moduna sahip; patlama performansı ve hata modu açısından tekrarlanabilir bir ürün elde edilmiştir.
2. Sızdırmazlık sınıfı olarak en az $10^{-9} \frac{\text{mbar.lt}}{\text{s}}$ değerinde He sızdırmazlığı elde edilmiştir. ASTM F2391-05'e göre bu değere sahip bir sistem Ultra-Fine Leaks sınıfına girmektedir. Elde edilen sızdırmazlık değeri atm.cc/sec cinsinden 0.987×10^{-9} 'dur. 20 yıl sonunda basınçlı tüp içerisindeki gaz basıncındaki düşüş hesaplaması ile ilgili detaylar 5.8'de belirtildiği gibidir. 20 yıl sonunda elde edilen basınç kayıp değeri 0.5 bar dan daha az olması,

kritik derecede öneme sahip diğer bir gereksinimin de karşılandığını göstermektedir.

5.8. He Sızdırmazlık Basınç Kaybı Hesaplamaları

Sızdırmazlık testi sonucu elde edilen He sızdırmazlık değeri $10^{-9} \frac{\text{mbar.lit}}{\text{s}}$ olarak alındığında; m^3 ve bar cinsinden bir yıllık toplam sızıntı oranı $31.56 \times 10^{-9} \frac{\text{bar.m}^3}{\text{yıl}}$ olarak elde edilmektedir.

Basıncılı tüp içerisinde 20 yıl boyunca bekleyecek olan gazın argon olduğu varsayılırsa; argon spesifik gaz sabiti $8.31 \times 10^{-5} \frac{\text{bar.m}^3}{\text{K.mol}}$ dir.

Basıncılı tüp içerisine gaz dolumu oda koşullarında yapıldığından nominal oda sıcaklığı olarak 20° de dolum yapıldığı varsayılmaktadır.

Molar cinsten yıllık sızıntı oranı çıkarıldığında; $12.74 \times 10^{-7} \frac{\text{mol}}{\text{yıl}}$ olarak elde edilmektedir.

$$\frac{31.56 \times 10^{-9} \frac{\text{bar.m}^3}{\text{yıl}}}{8.31 \times 10^{-5} \frac{\text{bar.m}^3}{\text{K.mol}} \times 298 \text{ K}} = 12.74 \times 10^{-7} \frac{\text{mol}}{\text{yıl}}$$

20 yıllık molar cinsten sızdırmazlık miktarı hesaplandığında; 254.8×10^{-7} mol olarak elde edilmektedir.

Dolum basıncı 500 bar olan ve 90 ml iç hacme sahip olan basınçlı tüpteki argon gaz miktarı, yaklaşık olarak 63 gram olduğu bilinmektedir. 63 gram argon yaklaşık 1,58 mol argon değerine eşittir.

Sonuç olarak elde edilen mol cinsinden sızdırmazlık değeri, tüp içerisindeki argon mol miktarına oranlanıp dolum basıncıyla çarpıldığında basınç cinsinden 20 yıl sonundaki basınç kaybı aşağıda belirtildiği gibi elde edilmektedir:

$$\frac{254.8 \times 10^{-7} \text{ mol}}{1.58} \times 500 = 8.1 \times 10^{-3} \text{ bar}$$

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasıyla; en az 900 bar patlama basıncına, en fazla $5 \times 10^{-8} \frac{\text{mbar.lt}}{\text{s}}$ He sızdırmazlık değerine sahip, ağırlığı 500 gr'dan az basınçlı tüp geliştirilmiştir. Yapılan testler neticesinde elde edilen sızdırmazlık değerine istinaden, sızdırmazlık analizi yapılan tüpün kontrollü ortamlarda depolandığı takdirde 20 yıllık görev ömrü biçilebildiği gösterilmiştir. Aynı şekilde kurulan alt yapılar sayesinde 800 bar'a kadar gaz dolumu sağlayabilen, 30 kpsi basıncına kadar sıvı ile basınçlandırılacak bir patlama düzeneği ve He sızdırmazlık dedektörü ile $10^{-13} \text{ Pa.m}^3/\text{s}$ sızdırmazlık değerine kadar ölçüm yapabilecek kabiliyet elde edilmiştir. Elde edilen titanyum tüpün bu nevi nitelikli sızdırmazlığı, elektron ışın kaynağı yönteminin başarımını göstermektedir. Bu başarımların ana savını oluşturmaktadır. Dahası bu çalışma sonuçlarının askeri standartlara uygun olduğu gözlemlenmiştir. Bu yönüyle istekleri karşılayan titanyum tüpün endüstriyel kullanımda özellikle savunma sanayiinde yerleştirilmiş bir ürün olarak ele alınabileceği değerlendirilmektedir. Bu, tez çalışmasına ek bir önem katarken söz edilen, standartlaşmış askeri isteklerin karşılanıyor olması da tez çalışmasının sonuçlarını doğrular niteliktedir. Çalışmada kaynak parametre karakterizasyonu ile termal kütle etkisinin olduğu sonucuna varılmıştır. Kaynak yapılan bölgedeki termal kütle etkisini göz ardı edebilmek adına, nihai üründe bulunan arayüzlere ait geometride kuponlar kullanılmış ve etki göz ardı edilebilmiştir. Kupon sayısı, maliyet etkin ve EBW parametrelerinin etkisini ortaya çıkarmak için 10 adetle sınırlı tutulmuştur. Mevcut arayüz için tamamlanan bu 10 adet kupon denemesinin ardından 2K tam faktöriyel çift tekrarlı, 2 parametre seviyesi ve 2 ana girdi belirlenerek orta noktası olan deney tasarımı tamamlanmıştır. Yapılan varyans analizi ve hipotezlerin test edilmesi ile kaynak nüfuziyetinde etkin girdi parametresinin ışın akım değeri olduğu gösterilmiş ve 2. dereceden denklemle parametrize edilmiştir. Mevcut geliştirilen sistem tek kullanımlık bir sistemin parçası olduğundan, çalışma boyunca herhangi bir şekilde basınçlı tüpün yorulması ile ilgili çalışma yapılmamıştır. Ürünün çoklu kullanımı söz konusu olduğunda, ürün yorulma açısından da incelenmeli ve bu etkiyi göz önünde bulunduracak ve bu konuda analiz, testler yapılması gerektiği değerlendirilmektedir. Yorulma etkisi söz konusu olduğunda gerilim giderme için ısıtma işlemi yapılması ve bu konu üzerinde de çalışılmasının uygun olacağı düşünülmektedir.

7. YORUM

Dünya çapında savunma sanayii sektörüne olan ilginin diplomatik dengelerden dolayı hızlı bir şekilde artması, bu alanda ülkelerin kendi bütünlüklerini korumak için savunma sistemlerine olan ihtiyaçlarından kaynaklanmaktadır. Bu bağlamda bu tez çalışması ile nokta savunmayı sağlayan ve kızıl ötesi arayıcı başlığa sahip; soğutma ihtiyacı olan dedektörlerinin soğutulmasında kullanılan gazı içerisinde barındıracak olan önemli elemanlardan biri olan yüksek basıçlı tüp tasarımı geliştirilmiştir. Bu tarz sistemlerin yurt dışından tedariki çoğu zaman diplomatik sebeplerden dolayı mümkün olmamakla birlikte; tedarik edilebilse ya da dışarıda geliştirilse dahi çok yüksek tekrarlanmayan mühendislik maliyetleri ile karşı karşıya kalınmaktadır.

Bu bağlamda bu tez çalışması ile 500 bar dolun basıncına, en az 900 bar patlama basıncına, en fazla $5 \times 10^{-8} \frac{\text{mbar.lt}}{\text{s}}$ He sızdırmazlık değerine sahip basınçlı tüpün elde edilmesinin yanı sıra, elektron ışın kaynağı yönteminin kullanılması ve Ti Gr5 malzeme için parametre karakterizasyon çalışması tamamlanmıştır. Tüp malzemesi olarak kullanılan Ti Gr5 malzeme kaynağı ile karşılaşılan zorluklar konvansiyonel kaynak yöntemleri ile çözülememiş ve yeni tip bir kaynak yöntemi kullanılması gerekliliği doğmuştur. Kullanılan elektron ışın kaynak yönteminin önemi sadece bu tez çalışmasındaki ürün kapsamıyla sınırlı kalmayıp, uzay uygulamalarında, uydu fırlatma sistemlerinde de kullanıldığı bilindiğinden, kaynak parametrelerinin karakterizasyonu ve elde edilen bağıntılar ileride yapılacak olan benzer çalışmalarda fayda sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Bu tez çalışması ile Ti Gr5 malzemeye sahip 2.5 mm kaynak kalınlığına sahip arayüz için tam nüfuziyetli kaynak parametreleri elde edilmiş olup; nihai parametre seti Çizelge 5-7'de belirtildiği gibidir. Aynı malzeme ile benzer et kalınlığına sahip arayüz elektron ışın kaynağı işlemlerinde bu parametrelerle birlikte, çalışmada elde edilen ve Şekil 5.56'da belirtilen ışın akımı ve kaynak nüfuziyet miktarı ilişkisi kullanılarak daha hızlı çözüme ulaşılabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] American Welding Society, Recommended Practices for Electron Beam Welding and Allied Processes, **2013**.
- [2] M.S. Węglowski, S. Błacha, A. Phillips, Electron beam welding - Techniques and trends-Review, Vacuum, vol. 130, 72–92, **2016**.
- [3] D. Dobeneck v., K.H. Steigerwald, S. G., B. R., D. Powers, O.K. Nazarenko, W. a. Dietrich, H. Irie, D. Wyatt, An International History of Electron Beam Welding, **2007**.
- [4] K.R. Schulze, Electron beam technologies, vol. 1e compact knowledge, DVS Media GmbH, Düsseldorf, 1-76, **2012**.
- [5] A. Klimpel, Welding Handbook, vol. 1, Silesian University of Technology, Gliwice, 601-654, **2013**.
- [6] J.L. Murphy, T.M. Mustaleski, L.C. Watson, Multipass, Autogenous Electron Beam Welding, Weld. J. 67, 187-195, **1988**.
- [7] Volker Adam, U. Clauß, D. Dobeneck, T. Krüssel, T. Löwer, Electron beam welding - The fundamentals of a fascinating technology, **2011**.
- [8] U. Reisgen, S. Olschok, S. Longerich, Laser beam welding in vacuum e A comparison with electron beam welding, Weld. Cut. 9, **2010**.
- [9] A. Saxena, Electron Beam Welding, Training Materials for Students, **2014**.
- [10] G. Zhang, X. Yang, X. He, J. Li, Enhancement of mechanical properties and failure mechanism of electron beam welded 300M ultrahigh strength steel joints, Mater. Des. 45, 56-65, **2013**.
- [11] S. Elliot, Electron beam welding of C/Mn steels e toughness and fatigue properties, Weld. J. 63, 8-16, **1984**.
- [12] W. Maurer, W. Ernst, R. Rauch, S. Kapl, A. Pohl, T. Krüssel, R. Vallant, N. Enzinger, Electron beam welding of a TMCP steel with 700 MPa yield strength, Weld. World 56, 85-94, **2012**.
- [13] M.St. Weglowski, S. Blacha, S. Dymek, M. Kopyscianki, Electron beam welding of high strength quenched and tempered steel, Mater. Sci. Forum, **2016**.
- [14] S. Błacha, M.S. Węglowski, S. Dymek, M. Kopuściański, Microstructural characterization and mechanical properties of electron beam welded joint of high strength steel grade S690QL, Arch. Metall. Mater. 61, 297-304, **2016**.

- [15] M.S. Węglowski, M. Zeman, A. Grocholewski, Effect of welding thermal cycles on microstructure and mechanical properties of simulated heat affected zone for a We ldox 1300 ultra-high strength alloy steel, *Arch. Metall. Mater.* 61, 127-132 **2016**.
- [16] H. Schultz, *Electron Beam Welding*, Abington Publishing, Cambridge, **1993**.
- [17] A.H. Meleka, *Electron Beam Welding*, McGRAW eHILL, London, **1971**.
- [18] R.K. Gupta, V. Anilkumar, X.R. Xavier, P. Ramkumar, Electron beam welding study of grade 1 CP Titanium, *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, 8464-8470, **2018**.
- [19] N. Suresh, M.G. Pillai, J. Mathew, Investigations into the effects of electron beam welding on thick Ti-6Al-4V titanium alloy, *J. Mater. Process. Technol.*, vol.192–193, 83-88, **2007**.
- [20] M.J. Donarchie Jr., *Titanium—A Technical Guide*, ASM International, **2000**.
- [21] B. Gupta, *Aerospace Materials*, vol. 1, S-Chand and Company Ltd., NewDelhi, **1996**.
- [22] J.L. Barreda, F. Santamaram, X. Azpiroz, A.M. Irisarri, J.M. Varona, Electron beam welded high thickness Ti–6Al–4V plates using filler material of similar and dissimilar composition to the base metal, *Vaccum* 62, 143-150, **2001**.
- [23] X. Yang, S. Li, and H. Qi, Ti-6Al-4V welded joints via electron beam welding: Microstructure, fatigue properties, and fracture behavior, *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 597, 225–231, **2014**.
- [24] Sandeep Thakare, Prof. N. Prabhu, Prakash Kattire, Valmik Bhavar, Dr. R.K.P. Singh, *Effect of Electron Beam Welding on Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Alloy*, **2016**.
- [25] C. Casavola, C. Pappalettere, F. Tattoli, *Mech. Mater.* 41, 231-243, **2009**.
- [26] S. Guide, Designation: B 600-91 (Reapproved 2002) e1 Standard Guide for Descaling and Cleaning Titanium and Titanium Alloy Surfaces 1, 91, **2006**, 1–3. www.astm.org.
- [27] Budynas–Nisbett, *Shigley’s Mechanical Engineering Design*, 9th ed., **2011**.
- [28] Anonim, <http://www.sciaky.com/eb-welding-systems/medium-chamber-systems> (Erişim tarihi: **5 Şubat 2019**).
- [29] Anonim, <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mtp641> (Erişim tarihi: **12 Mart 2019**).



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 27.05.2019

Tez Başlığı / Konusu: İç İçe Geçmiş Silindirik, Yüksek Basınç Altında Çalışabilen, Yüksek Sızdırmazlığa Sahip Titanyum Tüpün, Elektron Işın Kaynağı Yöntemi Kullanılarak Deneysel Kaynak Parametre Karakterizasyon Çalışması İle Elde Edilmesi

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 86 sayfalık kısmına ilişkin, 10/05/2019 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 2 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Adı Soyadı: Tolga ÖZKAYA

Öğrenci No: N10226413

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Programı: Yüksek Lisans Programı

Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

27.05.2019
Tarih ve İmza

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Doç. Dr. S. Çağlar BAŞLAMİŞLİ

(Unvan, Ad Soyad, İmza)

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Tolga ÖZKAYA
Doğum Yeri : İzmir
Medeni Hali : Evli
E-Posta : tolgaozkaya@live.com
Adresi : Bağlıca Mah. Tekdal Cad. 4/37 Etimesgut, ANKARA

Eğitim

Lisans : Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü (2006-2011)
Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı (2011-2019)

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce : İyi
Almanca : Orta

İş Deneyimi

Roketsan A.Ş (02.2013 - Halen)
Türk Traktör Fabrikası (01.2012 - 02.2013)
Certusoft Research & Development Company (08.2011 - 11.2011)

Deneyim Alanları

Mekanik ve Mekatronik Sistem Tasarımı

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar