

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

SERT LEHİM UYGULAMALARINDA FARKLI DOLGU
METALLERİNİN ÇELİKLER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ

EMRE AŞÇI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. BABÜR ÖZÇELİK

EYLÜL 2024

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

SERT LEHİM UYGULAMALARINDA FARKLI DOLGU
METALLERİNİN ÇELİKLER ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Emre AŞÇI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. BABÜR ÖZÇELİK

EYLÜL 2024

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

**INVESTIGATION OF THE MECHANICAL EFFECTS
OF DIFFERENT FILLER METALS IN BRAZING
APPLICATIONS ON STEELS**

Emre AŞCI

**A THESIS OF MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

ADVISOR: PROF. DR. BABÜR ÖZÇELİK

SEPTEMBER 2024

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 03/06/2024 tarih ve 2024/30 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 09/09/2024 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Emre AŞÇI'nın tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalı YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) : Prof.Dr. Babür ÖZÇELİK

ÜYE : Dr.Öğr.Üyesi Recep ÖNLER

ÜYE : Doç.Dr. Murat KIYAK

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR



*Aileme
ve
biricik eşime*

ÖZET

Bu tez çalışmasında, ticari araçlarda kullanılan hidrolik direksiyon sistemlerinin çelik borularının indüksiyon kaynak yöntemi ile kaynatılmasında dolgu maddesi olarak farklı materyallerin etkisi incelenmiştir. E235+N ve 11SMnPb30+C çelik malzemeleri, Ag309 ve RbCuZn-A kalite dolgu metalleri ile kaynatılarak birleştirilmiştir. Üç farklı sıcaklık ve üç farklı bekleme süresi kullanılarak kaynak parametreleri belirlenmiştir. TS EN ISO 5817 standartları dikkate alınarak gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre en iyi birleştirme oranı, gümüş alaşımlı dolgu metalinin 690°C’de 8 saniye, pirinç alaşımlı dolgu metalinin ise 930°C’de 9 saniye bekletilerek yapılan kaynaklarda elde edildiği tespit edilmiştir. DIN EN ISO 6832-1 standardına göre yapılan çekme testlerinde meydana gelen kopmalar yapılan kaynak tellerinden değil, boru ana malzemesinden gerçekleşmiştir. En iyi çekme testi değerleri Ag309 dolgu metali için 29.472kN, RbCuZn-A dolgu metali için 29.151kN hesaplanmıştır. Bindirme yöntemiyle yapılan birleştirme işlemlerinde her iki dolgu metali içinde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Gümüş alaşımlı telin pirinç alaşımlı tele göre yaklaşık 14 kat pahalı olması dikkate alındığında, pirinç alaşımlı telin maliyet açısından daha uygun bir alternatif olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dolgu Metalleri, İndüksiyon, Metalografi, Sert Lehimleme

ABSTRACT

In this thesis, the influence of different filler materials on the induction welding of steel pipes used in commercial vehicle hydraulic steering systems has been examined. E235+N and 11SMnPb30+C steel materials were welded and joined together using Ag309 and RbCuZn-A grade filler metals. Welding parameters were determined by employing three different temperatures and three different holding times. According to the experimental results conducted in compliance with TS EN ISO 5817 standards, the best welding performance was achieved when the silver alloy filler metal was held at 690°C for 8 seconds, and the brass alloy filler metal was held at 930°C for 9 seconds. Fractures observed in tensile tests conducted according to DIN EN ISO 6832-1 standard were found to originate from the base material of the pipe rather than the welding wires. The best tensile test values were calculated as 29.472 kN for Ag309 filler metal and 29.151 kN for RbCuZn-A filler metal. Similar results were obtained for both filler metals in lap joint operations. Considering that the silver alloy wire is approximately 14 times more expensive than the brass alloy wire, it was determined that the brass alloy wire is a more cost-effective alternative.

Keywords: Filler Metals, Induction, Metallography, Brazing

TEŞEKKÜR

Bu çalışmam süresince bana rehberlik ve destek sağlayan, her koşulda beni cesaretlendiren ve bana yol gösteren danışman hocam Prof. Dr. Babür Özçelik'e en içten dileklerimle teşekkürlerimi sunmak isterim. Tez çalışmamın yürütülmesi için gerekli olan her türlü kaynak, ürün, laboratuvar ve altyapı desteğini sağlayan Şafak Makine A.Ş. yönetim kuruluna sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım. Bu süreçte bana sürekli pozitif enerji veren, her fırsatta bana farkındalık yaratan ve motive eden biricik eşim Sn. Şerife AŞÇI'ya sonsuz teşekkürlerimi iletirim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırılması	3
2. LEHİMLEME	12
2.1. Yumuşak ve Sert Lehimleme	13
2.1.1. Yumuşak Lehimleme	14
2.1.2. Sert Lehimleme	14
3. İNDÜKSİYON ISITMA	16
3.1. İndüksiyon Kaynak İşlemi	17
3.2. İndüksiyon Kaynak Parametreleri	18
3.3. İndüksiyon Kaynağının Avantajları	19
3.4. İndüksiyon Kaynağında Farklı Malzemelerin Kaynağı	20
3.5. Metal Malzemelerin İndüksiyonla Kaynak İşlemi	21
3.6. Alüminyum Malzemelerin İndüksiyon Kaynağı	21
3.7. Farklı Ana Metallerin İndüksiyon Kaynağı	22
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	23
4.1. Malzeme	23
4.1.1. Dolgu Metalleri	24
4.1.2. Ana Metaller	26
4.2. Malzemelerin Deneysel Çalışma Öncesi Hazırlığı	28
4.2.1. Yıkama	29
4.2.2. Boraks Hazırlaması	30
4.3. Metalografi Numune Hazırlama	31
4.3.1. Numune Kesme İşlemi	31
4.3.2. Bakalite Alma	31
4.3.3. Zımparalama ve Parlatma	31
4.3.4. Mikroskop	32
4.4. Çekme Testi	32
4.5. Yöntem	33
5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	42
5.1. Kaynak Kusurları İçin Kalite Seviyeleri	42
5.2. Çekme Testi Sonuçları	44

5.3. Sertlik Ölçümleri	45
5.3.1. Brinel Sertlik Ölçüm Sonuçları	46
5.3.2. Vickers Sertlik Ölçüm Sonuçları	47
5.3.3. Optik Mikroskop Görüntüleri	49
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	52
 KAYNAKLAR	 53
ÖZGEÇMİŞ	59
TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR	60



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

DIN	: Almanyanın Uluslararası Standartlaştırma Enstitüsü
EN	: Avrupa Standartları Enstitüsü
TS	: Türk Standartları Enstitüsü
ISO	: Uluslararası Standartlar Örgütü
Cr	: Krom
Ni	: Nike
°C	: Santigrat
MÖ	: Milattan önce
MS	: Milattan sonra
Zn	: Çinko
Mn	: Magnezyum
Ag	: Gümüş
S.E.M	: Taramalı Elektron Mikroskopu
P	: Fosfor
Sn	: Kalay
Cu	: Bakır
µm	: Mikrometre
Cd	: Kadmiyum
Al	: Alüminyum
mm	: Milimetre
K	: Kelvin
MPa	: Megapaskal
ZrO ₂	: Zirkonyum Dioksit
kHz	: Kilohertz
W	: Watt
sn	: Saniye
s	: Saniye
kPa	: Kilopascal
Fe	: Demir
A	: Amper
Ga	: Galyum
Ge	: Germanyum
N/mm ²	: Newton/milimetrekare
PLC	: Programlanabilir Mantıksal Denetleyici
Au	: Altın
CNC	: Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
kN	: Kilonewton
daN	: Dekanewton
DIN 6892-1	: Metalin Oda Sıcaklığında Çekme Testi Standartı
HB	: Birnell Metal Sertlik Birimi
HV	: Vickers Metal Sertlik Birimi

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1: Mercek altında lehim örneği	12
Şekil 2.2: Sert lehim dolgu metalleri	14
Şekil 3.1: İndüksiyon bobini manyetik alan şeması	16
Şekil 3.2: İndüksiyon ısıtma	17
Şekil 3.3: İndüksiyon Kaynak İşlemleri	18
Şekil 3.4: İndüksiyon Kaynak Bobini	19
Şekil 3.5: PLC Kontrol Sistem	19
Şekil 3.6: İndüksiyonla kaynaklanmış çelik malzemeler	21
Şekil 4.1: Ultrasonik boru yıkama cihazı	29
Şekil 4.2: Ultrasonik yıkama cihazı	30
Şekil 4.3: Karışım kabı	30
Şekil 4.4: Sıvı Kabı	30
Şekil 4.5: DALI LT3 termal kamera	35
Şekil 4.6: Kaynatılan metallerin şematik görüntüsü	35
Şekil 4.7: İndüksiyon kaynak aparatı	36
Şekil 4.8: Çok sarımlı dolgu metali	36
Şekil 4.9: İndüksiyon bobin teli tasarımı	37
Şekil 4.10: Boraks malzemesinin boru metaline uygulaması	37
Şekil 4.11: İndüksiyon ısıtma	38
Şekil 4.12: Kaynak sonrası kesilen numune görseli	39
Şekil 4.13: Bakalit cihazı	39
Şekil 4.14: Parlatma cihazı	40
Şekil 4.15: Parlatılmış numune	40
Şekil 5.1: Ag309 dolgu metalinin kaynak uzunluğu ölçüleri	42
Şekil 5.2: Ag309 dolgu metali için kaynak mesafesi görseli	43
Şekil 5.3: Ag309 dolgu metalinin kaynak uzunluğu ölçüleri	43
Şekil 5.4: RbCuZn-A dolgu metali için kaynak mesafesi görseli	44
Şekil 5.5: Çekme testi yapılmış numune görselleri	44
Şekil 5.6: Dolgu metalleri için çekme kuvveti değerleri	45
Şekil 5.7: Boru metalinin sıcaklığa göre sertlik değerleri	46
Şekil 5.8: Çekme testi sonrası boru malzemesinin brinell sertlik ölçümü	46
Şekil 5.9: Vickers sertlik ölçüm örnekleme görseli	47
Şekil 5.10: 690°C'de gümüş kaynağının çelik borudaki sertlik grafiği	47
Şekil 5.11: 690°C de gümüş kaynağının otomat çeliği üzerindeki sertlik grafiği	48
Şekil 5.12: 930°C'de pirinç kaynağının çelik borudaki sertlik grafiği	48
Şekil 5.13: 930°C'de pirinç kaynağının otomat çeliği üzerindeki sertlik grafiği	48
Şekil 5.14: 690°C'de gümüş tel ile birleştirilmiş borunun optik görüntüleri	49
Şekil 5.15: 690°C'de gümüş tel ile birleştirilmiş çelik metalin optik görüntüleri	50
Şekil 5.16: 930°C'de pirinç tel ile birleştirilmiş borunun optik görüntüleri	50
Şekil 5.17: 930°C'de pirinç tel ile birleştirilmiş çelik metalin optik görüntüleri	51

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 4.1: Dolgu Metalleri Kimyasal Özellikler Tablosu	25
Tablo 4.2: EN10305-1 E235 (DIN 2391) Malzeme Sertifikası	27
Tablo 4.3: 11SMnPb30+C Malzeme Sertifikası	28
Tablo 4.4: Amper Sıcaklık Dönüşüm Tablosu	34
Tablo 4.5: Amper Sıcaklık Dönüşüm Tablosu	34
Tablo 4.6: Dolgu Metalleri İçin Deney Tabloları	36



1. GİRİŞ

Günümüzde otomotiv sektöründeki firmalar arasındaki rekabet hızla artmakta ve bu durum, verimlilik, kaynak yönetimi, idari ve teknik organizasyon gibi unsurlarla birlikte araçlardaki yapısal optimizasyon çalışmalarının önemini artırmaktadır. Buna bağlı olarak araçta ağırlık ve stresi azaltmak, sağlamlılığı arttırmak, üretilebilirliği kolaylaştırmak, üretim giderlerini ve hammaddeyi azaltmak beklenen hedefler arasındadır. Ağırlık azaltma çalışmaları düşük yakıt tüketimi sağladığından son kullanıcı tarafından da tercih edilmektedir. Son olarak otomotiv endüstrisindeki firmalar, araçlardaki harcanan akaryakıt miktarını azaltacak, enerji verimliliğini arttıracak ve geri dönüşüme uygun yeni çalışmalara yönelmiştir [1]. Hafif konstrüksiyonlu tasarımın en iyi yolu ağır olmayan malzeme kullanmaktır. Hafif malzeme kullanımı güvenlik kapsamında istenen kriterlere uygun olmayabilir. Bu sebeple değişik metaller denenerek rijit, stabil ve hafif bir yapı elde edilebilir [2].

Araçların ticari hidrolik direksiyon sistemlerinde kullanılan boru kompleksleri, genellikle yüksek ve düşük basınçlı hortumlar ile soğuk haddelenmiş hassas çelik borulardan ve ara metal bağlantılardan meydana gelir. Metal bağlantıların birleştirilmesinde sert lehimleme metodu tercih edilir. Bu yöntem, farklı ergime sıcaklıklarına sahip metallerin birleştirilmesi için düşük ısı gerektirdiğinden hızlı ve kolay bir yöntemdir.

Bu tez çalışmasındaki sert lehimleme türü indüksiyon kaynağıdır. İndüksiyonla kaynak, iki metalin ana malzemelerden daha düşük erime sıcaklığına sahip bir dolgu malzemesinin eriyerek bu iki malzeme yüzeylerini yayılarak doldurma işlemidir. Bu işlem sırasında ana metal ve dolgu metalinin paslanmaya karşı korunması, kaynak dekapanı veya pas önleyici gaz kullanımı ile giderilir. İndüksiyon kaynak otomotiv endüstrisi, elektro mekanik ve ev aletleri sektörlerindeki firmalar tarafından yaygın bir şekilde tercih edilmektedir [3]. İndüksiyonla sert lehimle yapılırken malzeme özelliklerine dikkat etmek de oldukça önemli bir husus olarak dikkate alınmalıdır. Örneğin, çelik indüksiyon ile kolayca ısınabilir, ancak iyi bir termal iletken değildir. Bakır ise yüksek indüksiyon enerjisine ihtiyaç duyar, fakat yüksek düzeyde bir termal

iletkenliğe ulaşabilir. Pirinç, bakır metale kıyasla indüksiyonla hızlı ısıtılabilir, ancak termal iletkenliği bakıra göre daha düşüktür.

Tez kapsamında kullanılacak olan ilk malzeme 11SMnPb30+C çeliğidir. Bu çelik, otomat çeliği olarak bilinir ve içerdiği karbon, kükürt, fosfor gibi malzemelerle oldukça sağlam bir yapıya sahiptir. Kullanımı sırasında kullanıcıya herhangi bir zorluk yaşatmaz ve inşaattan makine sektörüne kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Otomat çeliği, işlenebilir kolay bir yapıya da sahip olduğundan sıklıkla tercih edilir. Ayrıca, diğer çelik türlerine kıyasla daha uygun fiyatlı olması da kullanımının yaygınlaşmasını sağlayan faktörlerden biridir.

Kaynak işleminin uygulanacağı ikinci malzeme ise, E235+N metal özelliği gösteren DIN EN 10305 soğuk haddelenmiş borudur. Bu boruda otomotiv ve traktör sanayi başta olmak üzere makine sanayi, raylı sistemler, savunma sanayi sektörlerinde çok sık kullanılan ürünler arasındadır.

Otomotiv endüstrisinde; otomobil egzoz sistemleri, yakıt hatları, direksiyon sistemleri, hava kompresör sistemleri, debriyaj sistemleri, soğutma sistemleri, boru bağlantılarının hepsinde soğuk haddelenmiş boruların kullanımı yaygındır [4].

Kullanılacak ilk kaynak malzemesi AG309 gümüşüdür. Bu malzeme genellikle paslanmaz çeliklerin alaşımsız veya düşük alaşımlı çeliklerle yapılan kaynak uygulamalarında tercih edilir. %24 Cr ve %13 Ni içeren östenitik-ferritik tip bir gümüş kaynak metalidir [5]. AG309 gümüşün tercih edilme sebepleri arasında yumuşak ve kararlı bir ark, daha az sıçrama, güzel şekillenme özelliği, kolay cüruf çıkarma, iyi kaynak performansı ve çatlama direnci gibi özellikler yer almaktadır. Bu özellikler, kaynak işlemlerinin verimli ve kaliteli bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar. Kaynak malzemesi olarak kullanılacak ikinci malzeme ise pirinç kaynak çubuğu olarak da bilinen RbCuZn-A pirinç malzemesidir.

Bu tez kapsamında belirtilen malzemelere sert lehimleme uygulanacaktır. Lehimleme ile birleştirme işlemi; ilave dolgu metali yardımıyla (RbCuZn-A ve AG309) iki farklı veya aynı türden metalin (11SMnPb30+C ve E235+N), ana metallerde ergime olmadan birleştirilme işlemidir. Lehimle işleminde kullanılan dolgu metali, ana metallerin ergime derecesinden daha düşük ergime derecesine sahiptir. Bu sayede dolgu metali ergidiği halde ana metallerde herhangi erime veya metalurjik yapıda değişim olmadan birleşme sağlanır. Eğer kullanılan dolgu metalin ergime sıcaklığı

450°C üzerindeyse bu işlem sert lehimleme, 450°C altındaysa yumuşak lehimleme adını alır. Sert lehimleme; yüksek darbe ve titreşim dayanıklılığı, kolay ve pratik olması, ekonomik olması, görüntü olarak kaynağa göre daha estetik olması, otomasyona uygun olması gibi sebeplerden tercih sebebidir. Ek olarak lehimlemenin önemli özelliklerinden birisi de birbiri ile uyumu olmayan ve farklı türden parçaların birleştirilmesini gerçekleştirme imkânı sağlamasıdır.

Bu çalışma, indüksiyon kaynak işlemi kullanılarak farklı parametrelerin kaynak kalitesi ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Elde edilen veriler, TS EN ISO 5817 standardına göre kaynakların kalitesini belirlemek için kullanılmıştır [6]. Ayrıca, çekme deneyleriyle dolgu metallerinin ana metaller üzerindeki mekanik performansları da detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Sonuçlar, hangi kaynak parametrelerinin en iyi bağlanma oranlarını ve en iyi mekanik özellikleri sağladığını belirlemek için değerlendirilmiştir. Bu çalışma, endüstriyel uygulamalarda indüksiyon kaynak işlemi kullanılarak farklı metal kombinasyonlarının birleştirilmesinde optimize edilmiş parametrelerin belirlenmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

1.1. Literatür Araştırılması

Gümüş, insanlık için önemli bir malzeme olarak tarih öncesi çağlardan itibaren var olmuştur. Çok eski zamanlardan beri bilinmesine rağmen, bakır ve altından sonra ortaya çıkmıştır. Altının nadir olması ve dünyanın farklı bölgelerine yayılması nedeniyle gümüş daha erken dönemlerde kullanılmaya başlamıştır. Ayrıca, gümüş doğal olarak nadir bulunan bir madde olup, genellikle alt katmanlarda bulunmaktadır. MÖ 3100'lerde Mısırlılar, MÖ 2500'lerde ise Çinliler ve Farslar tarafından gümüş kullanımına dair belirtiler bulunmaktadır. Yunan tarihinde, Atina'da gümüş yataklarına rastlanmıştır ve MÖ 800'lerde Nil nehri havzasında gümüş para olarak kullanılmaya başlanmıştır. Gümüş metal malzemesi ilk olarak Romalılar tarafından işlenmeye başlandığı iddia edilmektedir. Gümüş metali günümüzde, bakır-kurşun ve pirinç üretimi sırasında ortaya çıkan yan ürünlerden elde edilirken, artan teknoloji ile birlikte daha karmaşık gümüş yatakları için çalışılmalar ele alınmıştır. [7].

Gümüş, yüksek derecede yansıtıcı, dövülebilir ve esnek bir metaldir. Ayrıca atmosferik koşullara karşı dirençli bir yapıya sahiptir. Bakır ve altından daha az, ancak

bakırdan daha fazla oksitlenme eğilimindedir. Asitlere ve bazı maddelere karşı dirençlidir, ancak nitrik asit ve yoğun sıcak sülfürik asit gibi güçlü asitlerle etkileşime girerek kolayca erir. Ayrıca, kükürt ve çeşitli kükürt bileşikleriyle hızla reaksiyona girer.

Pirinç, bakır elementine çinko ilavesiyle ortaya çıkan sarı renkli alaşımların türden adıdır. Bu alaşımlar, genellikle alüminyum, kurşun, kalay, nikel, mangan, fosfor, demir, antimon ve arsenik gibi diğer alaşımlarıda içerebilir. Bazı pirinç alaşımlarına manganez eklenmesi durumunda ise bu alaşımlara "bronz" veya "tunç" adı verilir. Bununla birlikte, tunç gerçekte kalay ve bakırın bir karışımıdır.

Pirinç, milattan önceki dönemlerden itibaren bilinmektedir. Kalamın pirinci, günümüze gelen tarihteki ilk pirinç örneklerinden biridir. Pirinç olduğunca sağlam ve işlenmesi kolay bir metaldir. İşlenebilirliği, içerdiği bakır miktarı ile orantılıdır. Bakır içeriği %55'in altında olan beyaz pirinçler, genellikle işlenmesi zor olan türlerdir ve sert lehim işlemlerinde kullanılırlar [8]. Daha işlenebilir olan pirinç türleri ise genellikle %62'nin üzerinde bakır içeriğine sahip alfa pirinçleridir ve soğuk işleme uygundur. Alfa pirinçler, civata, pim ve vidaların üretiminde sıkça tercih edilir. Diğer bir tür olan beta pirinçler ise daha az esnek olmasına karşı dayanıklılığı iyidir. Banyo aksesuarları ve mobilya sektöründeki bağlantı parçalarının imalatında kullanılır [9].

Lehimleme, uzun seneler endüstriyel sektörlerde yaygın olarak kullanılan bir birleştirme yöntemidir. Sert lehimleme ise genel olarak iki metalin arasına eklenen bir dolgu malzemesi vasıtasıyla birleştirme işlemidir. Bu işlem, birbirine sıkıca temas eden iki ana metal parçasının arasına yerleştirilen, erime noktası genellikle ana metallerin erime noktasından daha düşük olan dolgu metalinin kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Birleşme işlemi, dolgu metalinin ergime noktasına ulaşıldığında gerçekleşir. Bu süreçte, dolgu metalinin erimesiyle birlikte oluşan kapiller etki, dolgu metalinin ana malzemelerin kaynak alanına yayılmasını sağlar. Bu sayede, dolgu metalinin ana malzemelerin birleşim noktasındaki boşluklara yayılması sağlam bir bağlantı oluşumunu sağlar [10].

İnsanların uzun seneler bildiği ve tercih ettiği sert lehim yöntemi, çeşitli özelliklere sahip, ince ve kalın kesitli malzemelerin erimeden lehimlenmesinde uygulanan bir prosedür olarak önem kazanmaktadır. Endüstriyel sektörlerde metal malzemelerin birleştirilmesi gereksinimi, imalat süreçlerinde yaygın bir ihtiyaç halini almıştır. Bu

bağlamda, mekanik bağlantılar, kaynak uygulamaları, yapıştırma ve lehimleme teknikleri sıkça kullanılmaktadır. Farklı kesit ve özelliklere sahip metallerin aralarında birleştirilmesi durumunda, kimyasal elementlerin değişkenliği nedeniyle bağlantıların gerçekleştirilmesi zorlaşmaktadır. Ayrıca, yüksek mukavemet ve sızdırmazlık gereksinimlerinin karşılanması durumunda diğer bağlantı yöntemlerinin uygulanması mümkün olmayabilir. Bu tür durumlarda lehimleme tekniği önemli bir çözüm sunmaktadır. Lehimleme işlemi sırasında kullanılan ek dolgu metalinin 450°C' ve alt değerlerde erimesi durumunda yumuşak lehimleme, 450°C ve üzerinde erimesi durumunda ise sert lehimleme olarak adlandırılmaktadır [11].

Sert lehim yöntemi, ana metaller ile dolgu metali arasında birleşmenin oluşması için atomların yayılması yoluyla gerçekleşir. Sıkı bir bağ oluşturmayı sağlamak üzere atomların taşınma sürecini kolaylaştırmak ve birleştirme yüzeyinde zararlı maddeleri temizlemek amacıyla koruyucu dekapanlar kullanılır. MS 1500'lerde boraksın dekapan olarak kullanılması lehimleme tekniğinin daha da geliştiği belirtilmektedir [11].

Günümüzde neredeyse tüm sektörlerde sert lehimleme yöntemi, birleştirme işlemlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Otomotiv ve havacılık endüstrileri, uzay teknolojileri, nükleer enerji sektörü, beyaz eşya üretimi, makine imalatı, ısıtma, havalandırma ve klima sistemleri, kesici takım üretimi, armatür imalatı, gıda endüstrisi, tıbbi cihaz üretimi ve enstrüman aletlerinin imalatı gibi büyük bir yelpazede sert lehimleme tekniği uygulanmaktadır. Bu çeşitli sektörlerde, sert lehimleme yöntemi, farklı metal parçaların güvenilir ve dayanıklı bir şekilde birleştirilmesinde tercih edilen bir yöntemdir. Bu sayede, yüksek performans ve güvenilirlik gerektiren uygulamalarda sıklıkla başvurulmuş bir birleştirme teknolojisi haline gelmiştir [11]. Günümüz endüstrisinde sert lehimleme yönteminin geniş bir kullanım alanı bulmasının temel sebepleri, bu işlemin amaç ve önemini ortaya çıkarmaktadır. Birleştirme işleminde sert lehimleme metodunun önerilmesine sebep olan faktörler şu şekilde sıralanabilir [11]:

- Sert lehim işlemi ile birleştirilen ana metallerin kaynak bölgesi darbeye ve titreşime karşı dayanıklıdır.
- Sert lehim yöntemi kolaylıkla ve hızlı bir şekilde uygulanabilir, personel eğitimi kolaydır ve endüstri 4.0 sayesinde lehimleme işleminde robot kullanılabilir.

- Farklı erime sıcaklıklarına sahip metallerin birleştirilmesi ekonomik ve kolaydır.

- Sert lehimleme sıcaklığı 450°C'nin üzerindedir ve bu da birleştirilen metallerde tahribat riskini minimize eder, çünkü birleştirilecek malzemelerin erime sıcaklığının altında kalır.

- Bu birleştirme yöntemi diğerlerine kıyasla daha ekonomik bir bağlantı sağlar. Kaynak sonrası başka bir işlem gerekmez, bu da hızlı ve düşük maliyetli bir seçenek sunar. Ayrıca, sızdırmazlık gerektiren birleştirmelerde kolaylıkla uygulanabilir.

- Bağlantı bölgesinde dogal bir görünüm sağlar.

Sert lehimleme işleminde kaynak özelliklerini etkileyen pek çok faktör bulunmaktadır. Bunların lehimleme sürecindeki etkisi ve değişim gösterdiği koşullar bilindiğinde, lehimleme işlemi daha bilinçli bir şekilde gerçekleştirilebilir. Sert lehimlemede kaliteyi etkileyen faktörler şunlardır [12].:

1. Lehimleme alanı geometrisi.
2. Ana metallerin yüzey pürüzlülüğü.
3. Lehimleme telinin ana metal üzerine yayılma yeteneği.
4. Lehimlenen farklı metaller yeni bir metal oluşturması.

Tez kapsamında yapılan akademik çalışmalardan birtakım örnekler aşağıdaki gibidir.

[Miller and Schwanke, 1978] yaptıkları çalışmada, farklı metal malzemeler üzerine yayılan gümüş içermeyen dolgu metallerinin mekanik özelliklerini incelemiş ve karşılaştırmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, dolgu metallerinde ıslatabilirliği arttıracak ilave elementlerin etkilerinden bahsetmişlerdir. Ayrıca, Ag içeriğine sahip ilave metal ile yapılan lehimlerin, Cu-Zn-Mn alaşımlı ilave metaller ile yapılan lehimlere göre daha yüksek mukavemet, daha iyi ıslanabilirlik ve daha düşük ergime noktası gösterdiğini bulmuşlardır [13].

[Zaharinie et al., 2015] bakırların sert lehimlenmesi üzerine yaptıkları çalışmada, iki farklı bakır ana metalinin lehimlenmesi sırasında en uygun parametrelerin geliştirilmesini ve yüzey pürüzlülüğünün lehim bölgesi üzerine etkisini incelemiştir. Bu çalışmada, ticari saflıkta hazırlanan %99.99 parça numuneleri, Cu-Sn-Ni-P alaşımına sahip 6 ilave dolgu metal ile fırında kontrollü atmosfer altında sert lehimleme ile birleştirilmiştir. Yapılan 9 farklı lehimleme işlemi sonucunda, en uygun

lehim parametrelerinin 650°C/5dk. olduğu tespit edilmiştir. S.E.M mikroskop görüntülerinde, lehim bölgesi boyunca gaz boşlukları gözlemlenmiştir. Alaşımdaki P, Sn ve Cu yüzdelерinin lehim yüzeyine etkisinin olduğu belirlenmiştir. Bu bağlamda, 0,20 µm pürüzlülük değerine sahip deneyler ile en iyi boşluğa sahip lehimin sağlandığı ve belirtilen parametrelerde en uygun ısıtmanın ve birleştirmenin gerçekleştiği saptanmıştır [14].

[Çınar, 2010] bakırın sert lehimlenmesi üzerine yaptığı yüksek lisans tezinde, farklı alaşımların birleştirilmesinde farklı metallere sahip ilave tellerin bağlantı yapılarının mikroyapı ve mekanik özelliklerine olan etkisini araştırmıştır. Bu çalışma kapsamında, bindirme ile lehimleme işleminde ilave lehim metaline gümüş alaşımı katkısının malzeme yapısında kristal tanelerini incelttiği, kalay ilavesinin ise mikroyapıda boşluklara sebep olduğunu belirlemiştir. Ayrıca, alevle gerçekleştirilen lehimlemede, bindirme pozisyonundan kaynaklanan tavlama farklılıkları nedeniyle parçanın farklı bölgelerinde tane yapılarında farklılıklar gözlemlenmiştir. Ek olarak, L-CuZn39 ilave lehim metalinin kullanıldığı alın pozisyonunda, gözenek oluşumu gözlemlenmiştir. Çekme testinde lehim bölgesinden kopmalar görülmüş, bu durumun alın alına birleştirme için yeterli performans sağlamadığı tespit edilmiştir. L-CuZn40 ilave lehim metalinin kullanıldığı lehimlemede ise, tane birleşmesinin çok iyi olduğu belirlenmiştir. Son olarak, L-Ag40Cd ilave lehim metalinin kullanıldığı yüzey yüzeye yapılan lehimlemelerde, diğer dolgu metallerine göre daha düşük sıcaklığın lehimleme için yeterli geldiği gözlemlenmiştir [15].

[Şafak vd., 2022] yapmış oldukları çalışmada gümüş içerikli farklı dolgu metallerinin lehim bağlantısının özelliklerini incelemiştir. Çalışmalarında Ag-Cu-Zn ve Cd içeren lehim metalleri kullanarak yüksek dayanımlı ve uygun maliyetli bağlantı elde edilmesine odaklanmıştır. Sonuçlarda ilave telde Ag oranı arttıkça bağlantı dayanımında artış olduğunu bulmuştur [16].

[Sun et al., 2021] yaptıkları çalışmalarda, indüksiyon lehimleme metodu kullanılarak alüminyum metal ile çelik metalin birbirine lehimlemesi yapılmıştır. Deneyde SAE 304 paslanmaz levha ile 6AlO2 alüminyum malzemesi kullanılmış, farklı dizilişlere sahip Al-Zn dolgu malzemesi kullanılarak yüksek frekanslı indüksiyon lehimleme yöntemi kullanılmıştır. Birleştirme sonucunda lehim boşluğu 0.3mm olduğunda en iyi akma uzunluğu ve en iyi doldurma performansı elde edilmiştir. En yüksek kesme dayanımı Zn-15Al dolgu metaliyle 773 K de 30s de 81.52MPa hesaplanmıştır [17].

[Zhang et al., 2021] Ti-6Al4V titanyum ve ZrO₂ seramik malzemesi aynı ölçülerde (8mmx8mmx3mm) üretilmiş, ara dolgu malzemesi olarak 500µm kalınlığında Al-5wt%Si kullanılmıştır. Ultrasonik tutucu 5mm çapında titanyumdan üretilmiştir. Dolgu malzemesi iki malzeme arasına sandviç metodu ile sabitlenmiştir. Frekans 28.8 kHz ultrasonik güç 180W ayarlanmış, hava ortamında lehimleme yapılmıştır. Lehimlemede doğru bir birleşme yüzeyi elde etmek için ultrasonik tutucu ile numuneye 0.1MPa basınç uygulaması yapılmıştır. İlk olarak metaller fikstüre sabitleniyor. Bobinler ile ısı 700°C ye çıkarıldıktan sonra ultrasonik tutucu seramik yapıya 5sn ile 30sn arası baskı uyguluyor. İşlem tamamlandıktan sonra oda sıcaklığında soğumaya bırakılıyor. Deney sonucunda kayma gerilmesi-zaman-sıcaklık grafiğinde 700°C sıcaklıkta lehimleme kalitesinin en uygun olduğu gözlemlenmiştir. Ultrason süresi 20 sn iken maksimum çekme değeri 90,68 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değerle yapılan SEM analizlerinde dolgu malzemesinin her iki metalde zengin olarak görüldüğü tespit edilmiştir [18].

[Jiang et al., 2018] yüksek frekanslı sert lehimleme metodu ile WC15Co ile 35CrMo malzemesinin AgNi, CuZn, AgNi dolgu malzemeleriyle birleşmesi incelenmiştir. Farklı ısı ve süre parametreleriyle lehimleme işlemi yapılmış, sonrasında kopma testi yapılarak sem analizleri incelenmiş, mekanik özellikleri paylaşılmıştır. 30s süre için 710,725,740,755 ve 770°C sıcaklıklarda testler uygulanmıştır. Dolgu malzemesinde kullanılan Cu metalin kesme mukavemetini arttırdığı, Ni malzemesinin de azalttığı gözlemlenmektedir. Sıcaklığa göre kesme dayanımının değişimi tabloda verilmiştir. 740°C de 30sn boyunca yapılan lehimleme işlemi kesme dayanımı olarak maksimum seviyede (338MPa) olmuştur [19].

[Chen et al., 2022] çekme dayanımları sırasıyla 600MPa ve 650MPa olan 1Cr18Ni9Ti ile 1Cr21Ni5Ti metali arasına BMn70NiCr dolgu malzemesi eklenerek vakumlu fırında lehimleme işlemi yapılmıştır. Deneyde sandviç sistem kullanılmış olup yüzeylerin birbirine etkin temas etmesi için 6KPa basınç uygulanmıştır. Deney sonucu iki metal birbirinden koparılmış SEM analizleri incelenmiştir. Burada dolgu malzemesine yaklaşıp Fe elementinin azaldığı, Mn elementinin arttığı gözlemlenmiştir. Çekme dayanımının en yüksek olduğu sıcaklık 1125°C/15dk da 542MPa olarak belirlenmiştir. Lehim birleşiminin boşluksuz ve çatlaksız değeri 1175°C/30dk dır. 1175°C üzeri sıcaklıklarda lehim boşluğu ve çatlaklar meydana

gelmiştir. İndüksiyon sıcaklığı ve süresinin artmasıyla paslanmaz çelikteki Mn ve Cr yayılımı kolaylaştırmıştır [20].

[Zhao et al., 2022] deneyde TP2 bakır, 08F çelik malzeme arasına B25AgCuZn dolgu malzemesi kullanılarak lehimleme işlemi yapılmıştır. Lehim malzemesinin erime sıcaklığı 830°C, bakırın erime sıcaklığı 1083°C, lehim aralık miktarı 0.25mm dir. Beş farklı bobin modeli tasarlanmış, a bobini gerçek deneyde kullanılarak validasyon yapılmıştır. Kaynak parametreleri 31.8 kHz, 950A, ve 4.5sn olarak ayarlanmıştır. 3.5mm profil 0.1mm et kalınlığı profiller ile içerisinde su geçirilerek bobinlerin soğuması sağlanmıştır. Simülasyon ile gerçekleşen arasında %2.5 den küçük maksimum hata görülmüştür. Diğer tasarımlarda sadece simülasyon yapılmıştır [21].

[Long et al., 2016] yüksek frekanslı sert lehimleme metodunda sıklıkla kullanılan AgCuZn dolgu malzemesinin sandviç metot kullanılarak daha yüksek mukavemette birleştirme yaptığı SEM analizlerinde saptanmıştır [22].

[Zhang et al., 2022] deneyde metal boru ile metal tutucu arasına dolgu montajı yapmıştır. Bunun için iki farklı metal tasarımı yapılarak SAE 310S metalin boru üzerindeki mekanik özellikleri incelenmiştir. Yüksek frekanslı sert lehimleme metodunda BaCo_{0.7}Fe_{0.2}Nb_{0.1}O_{3-δ} alaşımlı borunun farklı kalınlıkta metal ve dolgu malzemelerine göre mekanik özellikleri incelenmiştir [23].

[Luo et al., 2021] Ag ve Cu bazlı dolgu elementleri ile 316LN paslanmaz malzeme üzerindeki yayımları ve çekme mukavemetleri incelenmiştir. Düşük sıcaklıklarda yapılan sert lehimleme işleminde Ag dolgu metalinin oranı arttıkça paslanmaz metal üzerine yayılımının arttığı, buna paralel olarak mekanik performansının da arttığı gözlemlenmiştir [24].

[Fedorov et al., 2017] otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılan paslanmaz ve alüminyum çeliklerin sert lehim ile birleştirilmesi için AlSi5 dolgu metali kullanarak mekanik özelliklerini incelemiştir. Paslanmaz çelik metal arasına alüminyum metalini sandviç sistem yöntemi ile birleştirmiş mekanik testlerini yorumlamıştır. Standart 600°C de sert lehimleme yapılmış, artan sıcaklıklardaki birleştirmelerde çekme mukavemetinin azaldığı gözlemlenmiştir [25].

[Wang et al., 2018] havacılık sektöründe kullanılan titanyum alaşımlı malzemelerin birbiri ile sert lehimleme metodu ile yüksek sıcaklıklarda birleştirilmesi çalışmalarını yapmışlardır. Farklı sıcaklıklarda yapılan çalışmalar sonucu Ti-48Al-2Nb-2Cr ile

ZrB₂-SiC alaşımları, CuTiZrNi dolgu metali ile en ideal 1213 Kelvin sıcaklıkta 600sn süre ile 266Mpa kesme mukavemeti optimizasyonu sağlanmıştır [26].

[Ma et al., 2016] pirinç ve 304 paslanmaz çeliğin sert lehimlemesinde 17AgCuZnSn alaşımlı dolgu metalinin ana metaller üzerindeki mekanik etkilerini incelemişlerdir. Dolgu metaline Ga metali eklenerek mukavemet ve sertlik ölçümleri yapılmış, en optimize dolgu metali 17AgCuZnSn₂Ga olarak belirlenmiştir [27].

[Cui et al., 2023] bakır alaşımlı dolgu metaline Ge ilave ederek sert lehim birleştirmesi uygulamışlardır. Mukavemet ve kaynak kalitesinin arttığını sem analizi ve çekme testleri ile gözlemlemişlerdir [28].

[Sisamouth et al., 2010] et kalınlığı 1mm olan iki boruyu birbirine sert lehimleme yöntemi ile birleştirmesini yapmıştır. Aralarındaki lehim boşluğu 0.5mm uygulanmıştır. Dolgu malzemesi olarak kadminyum içermeyen gümüş alaşımlı dolgu malzemeleri denendi. Gümüş oranı %60 sabit tutularak bakır ve indiyum elementleri değiştirildi. Yapılan çalışmada indiyum elementinin artması ile indüksiyon sıcaklığında azalma görüldü. Bunula birlikte ötektik yapı oluşturduğu için kırılma ve mekanik özelliklerde yetersiz görüldü [29].

[Xie et al., 2020] yüksek frekanslı sert lehimleme metodunda indüksiyon akımı ile ısının S30408 paslanmaz malzeme üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırmıştır. S30408 paslanmaz kalınlığı 4mm olan metal, çekme deney çubuğu standartlarında üretildikten sonra 100°C ile 900°C arasında sıcaklıklarda 15dakika ısı uygulaması yapıldıktan sonra serbest soğumaya bırakılmıştır. İşlem sonrası çekme testleri yapılmış mekanik özelliklerinin değişkenliği incelenmiştir. Sıcaklık arttıkça elastik modül ve akma dayanımının düştüğü tespit edilmiş, 900°C de hammaddenin %64.2 sine gerilediği hesaplanmıştır [30].

[Du et al., 2023] yaptığı deneyde Ø20x1mm T2Cu boru ile Ø15x2mm Al alaşımlı boru birbirine 1.5mm boşluk ile sabitledi. Dolgu metali Zn₃Al iki malzeme arasına yerleştirildi. Bobinler yardımıyla ısıtılan sistemle makul boşluk elde edildi. Yüksek frekanslı sert lehimleme de 6.6 kW, 100-500kHz kullanıldı. Deney sırasında 15.9A akım 220V indüksiyon ısıtma (420°C ve 8sn) yapıldıktan sonra kademeli olarak hava ile soğutuldu. Sonuç olarak Cu/Al farklı metal boruların Zn-3Al dolgu metali arasında mükemmel metalurjik yapışma elde edildi. Mikroyapı incelendiğinde çatlak ya da

boşluk görülmedi. Cu/Al farklı kaynağın çekme dayanımı 75MPa oldu ve T2 Cu boruda kırılma oluştu [31].

Son örnek olarak Haziran 2023'te "Farklı Dolgu Malzemelerinin Farklı Malzemeler Üzerine Lehimleme Yöntemlerinin İncelenmesi" konu başlıklı Yüksek lisans araştırmam şu şekildedir.

Günümüzde otomotiv sektöründeki firmalar arasındaki rekabet hızla artmakta ve bu durum, verimlilik, kaynak yönetimi, idari ve teknik organizasyon gibi unsurlarla birlikte araçlardaki yapısal optimizasyon çalışmalarının önemini artırmaktadır. Buna bağlı olarak araçta ağırlık ve stresi azaltmak, sağlamlılığı arttırmak, üretilebilirliği kolaylaştırmak, üretim giderlerini ve hammaddeyi azaltmak beklenen hedefler arasındadır. Ağırlık azaltma çalışmaları düşük yakıt tüketimi sağladığından son kullanıcı tarafından da tercih edilmektedir [32].

Yapılan literatür araştırmaları incelendiğinde indüksiyon sert lehimleme metodunun ağırlıklı olduğu görülmüştür. Farklı malzeme ile yapılan kaynak birleştirmeleri zordur. Bu tip durumlarda genelde indüksiyon sert lehimleme yöntemi uygulanmaktadır. İndüksiyonun diğer metotlara göre avantajları basit lehimleme, ucuz, düşük enerji, temassız ısıtma, belirli bir alanda ısıtmanın yanı sıra nitelikli operatör gereksinimini ortadan kaldırdığı gibi ekipman ihtiyacını da azaltmaktadır.

İndüksiyon yöntemine ilave olarak birleştirme yüzeylerinin daha homojen çıkması için metallere ilave olarak baskı uygulanmıştır. Kullanılan dolgu malzemelerinin birleştirmedeki etkenleri, buna bağlı olarak SEM analizleri ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

İndüksiyon yönteminde ana metaller erimelediği için dolgu malzemesinin ana metaller üzerindeki akma, yayılma etkileri, farklı dolgu metallerinin kaynak birleştirmelerindeki akması ve kesme mukavemetleri incelenmiştir. Birleştirmelerde sandviç yöntem kullanılmıştır.

Bu bilgiler ışığı altında bu tez çalışmasında metal malzeme ile farklı kaplama kalınlıklarındaki metal borunun RBCuZn-A ve Ag309 dolgu malzemesi kullanılarak indüksiyon kaynağındaki birleşimleri sonucu ortaya çıkan mekanik özellikler incelenmiştir.

2. LEHİMLEME

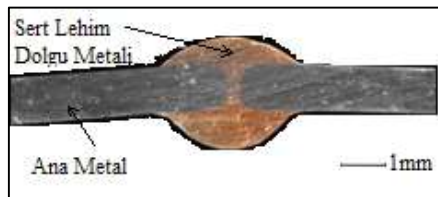
Lehimleme birden fazla metal elementin, nispeten düşük ergime derecelerindeki bir dolgu metalinin eritilip lehimlenecek bölgeye yayılması sağlanarak, sabitlenmesi işlemidir.

En çok kullanım alanları baskı devrelerinin montajlanması işlemidir. İnşaat sektöründeki ısıtma ve soğutma borularının bağlantısında da yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Lehim, mücevher parçalarını bir araya getirme ve tamir etme, küçük mekanik parçaların bir araya getirilmesi gibi işlerde yaygın olarak kullanılır. Ayrıca, cam vitray üretimi de lehimin başka bir kullanım alanını oluşturur. [33].

Lehim yapılırken, el aletleri kullanılabilir ya da seri bir şekilde otomasyona adapte edilebilir. El lehimleme sürecinde genellikle lehim tabancası veya havya kullanılırken, bazen sıcak hava üfleyicisi de tercih edilebilir. Ayrıca, lehimleme pastası, kaliteli bir lehim bağlantısı sağlamak ve paslanmayı engellemek için kullanılabilir.

Lehim işlemi, kaynak tekniği ile karşılaştırıldığında, metal parçaları kalıcı olarak birleştirmek için temel metallerin ergitildiği kaynak işleminden farklıdır. Lehimlemede, ilaveten dolgu metalleri eritilir. Çoğunlukla, kaynaklanmış birleştirmelerin direnci lehimlenmiş olan metallerden daha fazladır. Sert veya yumuşak lehimleme, ergitme kaynağı yerine tercih edilir, özellikle aşağıdaki durumlarda [33].:

- Ana metallerin birleştirme yeteneği iyi değilse.
- Birbirinden farklı ana metaller birleştirilmekteyse.
- Yüksek lehimleme ısısı, birleşecek ürünlere zarar verebilme riski taşıyorsa.
- Birleştirme bölgesinin matriski kaynağa elverişli değilse.



Şekil 2.1: Mercek altında lehim örneği.

Kaynağa kıyasla sert lehimlemenin üstün özellikleri şu şekildedir:

- İstenilen iki metalin birleştirilmesinin mümkün olması.
- Seri üretim şartlarına uygun, hızlı ve tekrarlanabilir şekilde olması.
- Yüksek adetli bağlantıların eş zamanlı lehimlenebilmesi.
- Ergitme ısısına göre daha düşük sıcaklık ve enerji gerekliliği.
- Hammadde, personel ve ekipman giderleri toplamının daha düşük olması.

Sert lehimlemenin zayıflıkları ve sınırlamaları da şu şekilde sıralanmıştır.

- Rijitlik, kaynaklı bağlantılara göre çoğu zaman düşük olması.
- Rijitlik, asıl metalinkinden düşük olması.
- Görünüm kontrolü yönünden, lehim ile metal arasında renk aykırılığının gözlemlenebilir olması.

2.1. Yumuşak ve Sert Lehimleme

Lehimlemeler türlerine göre 2 ana başlık altında incelenebilirler. Bunlar; yumuşak ve sert lehimlemedir. Yumuşak lehimleme erime sıcaklığı 450°C ve aşağı olanlardır. Hafif olan ve ısı gerektirmeyen elektronik sistemlerde kullanılır. Sert lehim Erime sıcaklıkları 450-1100°C arasındadır. Yumuşak lehime kıyasla güç gerektiren sistemlerde kullanılır. Makine imalat konstrüksiyonunda tercih edilen grupta yer almaktadır.

İki lehimleme yönteminde de birleşme sağlamak için ilave dolgu metalleri kullanılır, kaynaktan farkları ise birleştirme esnasında ana metaller ergimez. Bu yüzden lehimleme yöntemlerinin ergitmeli birleştirmelere göre tercih edilebilmesi için:

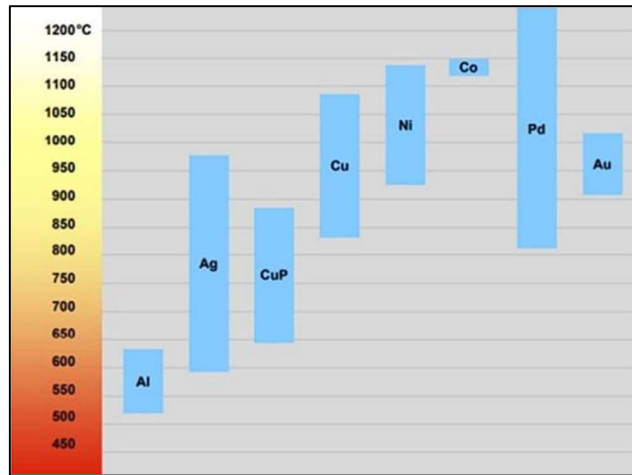
- Birleşimi yapılacak metal malzemelerin kaynak kabiliyetinin kötü olması.
- Birbiri ile uyumsuz, farklı cinsten metallerin olması.
- Kaynak esnasında meydana gelen kaynak ısısı, ana metallere zarar vermesi.
- Bağlantının geometrik şeklinin kaynak işlemini kısıtlaması.
- Birleştirme bölgesinde çok yüksek dayanım istenmemesi tercih sebepleridir.

2.1.1. Yumuşak Lehimleme

Kullanılan ilave dolgu metalinin erime sıcaklığı 450°C ve altında ise yumuşak lehimleme denir. Yumuşak lehimleme; kaynaklı işlemin pratik ve ekonomik olmayan metallerde, tasarım veya parça geometrisinden dolayı kaynaklı işlemin zor olduğu durumlarda, boyut olarak diğer birleştirme teknikleriyle birleştirilemeyecek kadar hafif parçalarda, elektronik bileşenleri devrelere lehimlemek ve genel elektrik bağlantılarında, ek olarak bakır boru ve bakır konektörler arasındaki sıhhi tesisat bağlantılarını lehimlemek için de kullanılır. Yumuşak lehim genellikle elektrik veya gazla ısınması sağlanan havya ile birleştirme sağlanır. Yumuşak lehimleme her ne kadar pratik ve ekonomik olsa da sert lehim veya kaynak kadar sağlam değildir [33].

2.1.2. Sert Lehimleme

İki veya daha fazla metalin ilave dolgu metali kullanılarak temas eden yüzeyler arasında ilave metalin kapiler etki ile dolaşarak birleşme yapılmasıdır. Ana metallerde herhangi erime görülmez, dolgu metalinin eriyeceği sıcaklık yeterlidir. İlave metalin ergime derecesi 450°C'den yüksek ancak ana malzemelerden düşüktür. Birleştirme yöntem seçimleri, ana malzemelerin türüne, birleşmenin hangi amaçla yapıldığına, maliyete, parça geometrisine göre değişebilir. Bu lehimleme yöntemleri indüksiyon lehimleme, daldırma-lehim, direnç-lehim, lazer lehimleme ve fırın lehimleme diye bilinmektedir. Lehimlenecek ana parçaların arasında küçük lehimleme aralığı bırakılmaktadır. Bu aralık dolgu metali ergitilip, kapiler etki sayesinde lehimleme aralığına dolaşarak birleşmesini sağlar [34].



Şekil 2.2: Sert lehim dolgu metalleri.

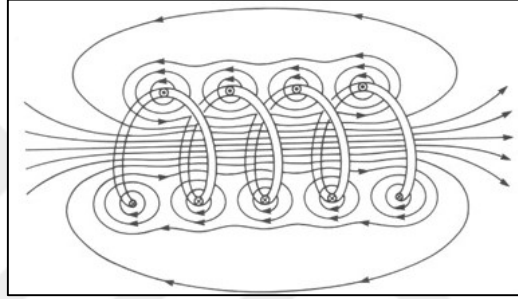
Sert lehimleme tercih sebepleri [34].:

- Sert lehim yüksek şiddetteki şok ve titreşimlere dayanabilmesi.
- Sert lehimleme basit ve hızlıdır. Lehim kabiliyetini ustalar kaynağa göre daha kolay kazanabilmesi.
- Farklı imalat usulüyle üretilmiş parçaları, gözenekli parçaların birleştirebilmenin mümkün olması.
- Sert lehimleme işleminin genelde tek aşamada tamamlanması.
- Sert lehimlemede sıcaklık eğitmeli birleştirmelere göre daha düşük olduğundan ana metallerde, çarpılma ve seyrelme görülmemesi.
- Genellikle kaynaklı birleştirmeye göre birim maliyetinin daha ekonomik olması.
- Birleştirme sünekliği yüksek olması.
- Yüzey gerilimi oluşturmaması.
- Ölçü toleranslarının kaynaklı birleştirmeye göre çok iyi olması ve daha güzel bir görüntüye sahip olması.
- Kaynaktaki gibi parçaların aşırı ısınması, çarpılma veya ana metalin eriyip metalürjik özelliklerinin değişmesi gibi sorunların olmaması.

3. İNDÜKSİYON ISITMA

İndüksiyon, bir sistemden bağımsız olarak başka bir sisteme fiziksel temas gerektirmeden enerji yükleme eyleminin gerçekleştirilmesidir.

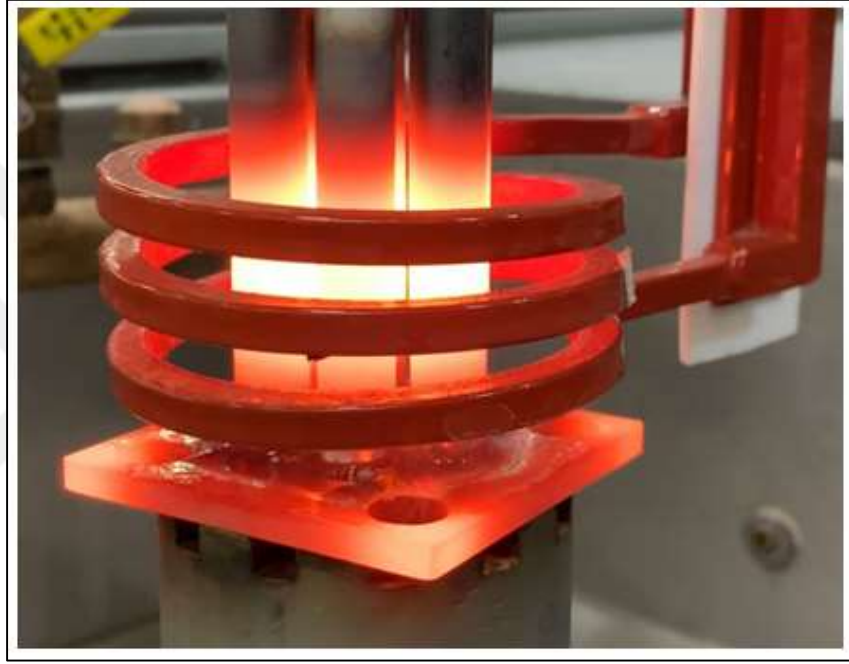
Bu sistem, metal malzemenin iç direnci nedeniyle kuvvetli bir manyetik alan içinde oluşturduğu elektrik akımının, malzemenin üzerinde yüksek ısı açığa çıkarması prensibine dayanır. Bu yöntem, lehimleme, ergitme, kaynak, tavlama sertleştirme gibi geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılır.



Şekil 3.1: İndüksiyon bobini manyetik alan şeması.

Genel olarak, indüksiyon hayatın pek çok noktasında yer alır. Özellikle imalat sektörü için indüksiyon önemli bir yere sahiptir. İndüksiyon birçok amaca uyum sağlayan makine seçeneklerini bir arada sunar. Bu sayede başta ısıtma olmak üzere pek çok alanda indüksiyon desteğinden faydalanılabilir. İndüksiyon özellikle kaynak, eritme, şekillendirme ve ısıtma gibi işlemlerde etkin rol oynar. Geleneksel yöntemlere göre pahalı olmasına rağmen proses zamanını ortadan kaldırarak, tek aşamalı bir lehimleme sürecinde oksidasyonu azaltmak için doğal olarak cüruf oluşumunu indüklerler. Bu, gereksiz gözeneklerin oluşumunu azaltır, zararlı mikroyapısal özellikleri azaltır ve ayrıca doldurma malzemesinin eksik penetrasyonunu en aza indirir, böylece birleşim gücünü artırır [35]. İndüksiyon sayesinde elektriksel iletkenliği olan metaller üzerinden işlem yapılabilir. Buna göre, karbonlu metaller yüksek herzde elektrik kullanarak yüksek kalitede ısıtma oluşmasına olanak sağlar. İndüksiyon makineleri imalat alanında uzun zaman ve enerji gerektiren birçok işlemin daha hızlı bir şekilde yapılmasına olanak sağlar. Özellikle, metallerin ısınması ve şekillenmesi açısından pek çok kolaylığı bir arada sunar [36].

İndüksiyon ısıtma, yüzey sertleştirme, yumuşatma, ön ısıtma, eritme ve metallerin kaynaklanması gibi işlemlerde iyi bilinmektedir. Beyaz eşya endüstrisinde kompresörler ile radyatörleri arasındaki boru birleştirmesi, dar boruların lehimlenmesi konusunda ileri teknolojilerin geliştirilmesine ilham vermektedir. Yıllardır, elektromanyetik indüksiyon lehimleme, yüksek ısıtma hızı, yüksek güvenilirlik, çevre dostu olma ve düşük üretim maliyeti gibi avantajlarından dolayı bu taleplere yanıt vermektedir [37].



Şekil 3.2: İndüksiyon ısıtma.

3.1. İndüksiyon Kaynak İşlemi

Bu kaynak, iki metalin yüzeylerine yayılan düşük erime sıcaklığına sahip dolgu malzemesi ile eritme, akıtma ve yapıştırma yöntemidir. Bu yöntem sırasında metal ile dolgu metalinin paslanmaya karşı korunması için kaynak dekapanı yada pas önleyici gaz kullanılır. İndüksiyon, ısıtma sistemlerinin önemli bir yöntemidir, çünkü temas gerektirmeyen bir ısıtma sürecidir. Bu süreçte, elektrik iletkenliğine sahip metaller yüksek frekansta elektrik kullanılarak doğru ve hassas bir şekilde ısıtılır. Prensip olarak, indüksiyon ısıtma elektrik enerjisini ısı enerjisine dönüştürür. Diğer yöntemlerden farkı, ısıtılacak parçanın içinde oluşturulur. Bu bağlamda, ısıtılacak parçanın iletken olması gereklidir. İndüksiyonlu ısıtma, metalin ısıtılması, eritilmesi,

yüzeyin sertleştirilmesi ve kaynak yapılması gibi çeşitli uygulamalara sahiptir. İndüksiyonla kaynak yöntemi, diğer bilinen kaynak yöntemlerine göre çeşitli avantajlar sunar, bunlar arasında yüksek güç yoğunluğu, duman ve atık olmaması, temas gerektirmemesi, yüksek kaynak kalitesi, bölgesel ısınma ve kaynak imkanı sağlaması, geometrik deformasyon ve iç yapı değişikliklerinin olmaması gibi avantajlar bulunur.

İndüksiyon kaynağı ile ısı, iş parçasında elektromanyetik olarak indüklenir. Endüksiyon kaynağı, boruların ve boruların kenar kaynağı için idealdir. Bu süreçte borular yüksek hızda bir indüksiyon bobininden geçer. Bunu yaparken, kenarları ısıtılır ve ardından uzunlamasına bir kaynak dikişi oluşturmak için birlikte sıkıştırılır. İndüksiyon kaynağı özellikle yüksek hacimli üretim için uygundur [38].



Şekil 3.3: İndüksiyon Kaynak İşlemleri.

3.2. İndüksiyon Kaynak Parametreleri

Bakır boru tasarım: Bakır boru tasarımında, kaynak yapılacak alana eşit olarak yayılacak şekilde ısının dağıtılması önemlidir. Bu tasarımda, bakır boru kullanılır ve içinden saf su geçirilerek soğutma sağlanır. İndüksiyon bobinleri, numunenin kaynak yapılacak bölgesine özel olarak örülür ve işlem bölgesindeki ısının korunması sağlanır. İndüksiyon bobinleri, tek bükümlü veya numuneye özel olarak çoklu şekilde tasarlanabilir. Bu bobinler, kaynağın yapılacağı alana en yakın şekilde yerleştirilerek enerji transferini verimli bir şekilde sağlar ve hızlı ısınma sağlar.

Sıklık ve kuvvet: Frekans, kaynak bölgelerinin boyutları ve malzemenin özelliklerine bağlı olarak belirlenir. Düşük frekanslı uygulamalarda, ısının malzemenin iç kısımlarına işlemesi daha etkilidir. Özellikle kaynak bölgeleri kalınsa, malzemenin

iletkenliği, istenilen kaynak sıcaklığına ulaşma süresinde önemli bir faktördür. Güç seçimi ise malzemenin geometrisi ve özelliklerine göre ayarlanır [39].

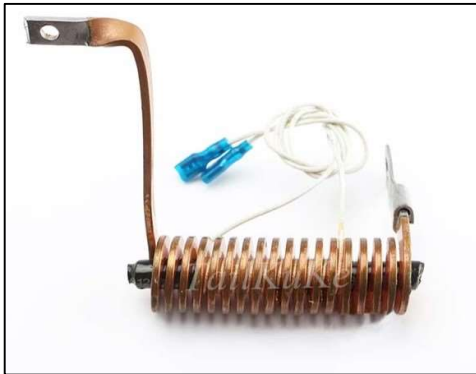
Zaman: Metal yüzeylerin birleştirilmesi için indüksiyon ısıtmanın önemli bir özelliği, yüzeylerin kısa sürede kor haline gelmesidir. Genellikle, 8-10 saniyelik işlem süreleri indüksiyon ısıtmasında standart olarak kabul edilir. Ancak, büyük parçalar veya elektrik direnci ve manyetikliği düşük olan parçaların ısıtılması daha uzun sürebilir [39].

Kaynak Pastası: Dekapanın önemi, paslanmayı engellemesi ve kaynak alaşımının akışkanlığını arttırmasıdır [39].

Açık hava: Alternatif olarak, atmosfer kontrollü kaynak, kaynak dekapanının yerine kullanılabilir. Bu yöntemde, koruyucu gazın seçimi, kaynak yüzeylerine ve kaynak alaşımının malzemesine göre belirlenir [39].

Isı kontrolü: İndüksiyon kaynağında sıcaklık kontrolü için en yaygın kullanılan yöntem, yüksek sıcaklık kızılötesi lazer termometresidir. İndüksiyon makinesine bağlanan bu termometre, anlık kontrol sağlar [39].

Endüstri 4.0: Hidrolik fikstür, divüzör, numerik kontrol, robot kolu ve buna benzer sistemler indüksiyon kaynak makinalarına kolaylıkla adaptasyonu sağlanabilir [39].



Şekil 3.4: İndüksiyon Kaynak Bobini.



Şekil 3.5: PLC Kontrol Sistem.

3.3. İndüksiyon Kaynağının Avantajları

İndüksiyon kaynak yöntemi, metalleri eritmeden mukavemetli ve rijit birleşim noktaları oluşturabilmektir. İndüksiyon kaynağı, diğer birleştirme tekniklerine kıyasla çeşitli üstünlükler sağlar. Bu üstünlükler şunlardır [39];

- Farklı ve aynı metallerin kolayca birleştirebilmesi.
- Seri lehimleme işlemi sağlanması.
- Daha az enerji ve ucuz yöntem sağlanması.
- İndüksiyon ısıtmanın istenen alanda olmasıyla istenilen alanın sadece ısıtılabilmesi.
- Alevle kaynaktan daha güvenli olması.
- İşlemin standart ve basit hale getirilebilmesi ve tekrarlanabilmesi.
- İndüksiyondaki bakır boruların iş parçalarına göre değiştirilebilmesiyle kolay çözümler sunulabilmesi.
- Diğer yöntemlere göre çok düşük sıcaklıklarda birleştirme yapılarak hurda oluşmasının ve gerilmenin azaltılması.
- Üretilen parçanın geometrik ölçüleri kolayca kontrol edilebilmesi.
- Ürüne temas etmeden ısıtmanın sağlanabilmesi.
- Sıcaklık mesafesinin kontrol edilebilmesi ve bu sayede kritik numenelerde işlemler yapılabilmesi.

İndüksiyon ısıtma, sert lehimleme ve buna benzer diğer kaynak yöntemlerinin bazı sorunlarını çözer. Kritik parçaların üretimi için basit ve tekrarlanabilir bir üretim süreci sunarken nitelikli kaynak ustası gereksinimini azaltır, enerji ihtiyacını düşürür ve takım aparat ihtiyacını azaltır.

3.4. İndüksiyon Kaynağında Farklı Malzemelerin Kaynağı

İndüksiyon ile birleştirme, ayrı metallerin birleştirilmesi için kolay ve üstün yöntemlerden biridir. Ayrı metal malzemelerin indüksiyon yöntemi ile uygulamalarına örnek olarak bakır ile çelik, bakır ile pirinç ve pirinç ile çelik gibi örnekler verilebilir. Bu ana malzemelerin indüksiyon birleştirmesindeki başarı, doğru zamanlama ve indüksiyon ısıtma gücünün hassas bir şekilde ayarlanmasıyla elde edilir. Farklı ana metallere indüksiyon gerçekleştirilirken, doğru bir lehim dikişi elde etmek için iki metalin birbirine yakın lehimleme sıcaklığına gelmesi önemlidir. İndüksiyon kaynak çözümleri geliştirilirken, malzemelerin ısı aktarmaları ve istenen ısı miktarına gelme değeri gibi faktörler gözden geçirilmelidir [39].

3.5. Metal Malzemelerin İndüksiyonla Kaynak İşlemi

Metal, aşırı elektrik direncinden dolayı indüksiyon yöntemiyle kolayca istenen sıcaklık değerlerine ulaşılabilir, ancak termal iletkenlik direnci düşük olduğundan, kaynak işlemi kontrollü bir şekilde yapılmalıdır. Metal kaynağında, ısının kaynak alanına homojen bir şekilde yayılması ve dolgu metalinin akması önem arz etmektedir [39].

Karbonlu metallerin kaynağına bakıldığında ucuz ve kalitesiz bakır içeren alaşımlar, paslanmaz metallerinin kaynağında ise nikel bazlı dolgu metalleri tercih edilir.



Şekil 3.6: İndüksiyonla kaynaklanmış çelik malzemeler.

3.6. Alüminyum Malzemelerin İndüksiyon Kaynağı

Bu kaynak, özellikle havacılık endüstrisinde ağırlıklı olarak kullanılır. Bu kaynak metodunun uygulanabilirliği diğer kaynak metodlarına göre daha zorlu ve risklidir. Bu uygulamadaki risk, doğru sıcaklığın elde edilmesinin kritik önem taşımasıyla ilişkilidir. Alüminyum metalinin ergime ve kaynak sıcaklıkları arasındaki farklar birbirine çok yakın olabilir. Bu nedenle, istenen sıcaklığın sağlanması ve bu sıcaklığın kontrol edilmesi önemlidir. İndüksiyon bobin tasarımı sıcaklığın kontrol edilmesinde en büyük etkenlerden biridir.

Alüminyum metalinin düşük ergime sıcaklığı göz önüne alındığında, indüksiyon birleştirmesi sırasında bobinin ısıtma bölgesinin iş parçasına doğru yakınlaştırılması

gerekir. Bu, iş parçasının kenarlarının ısınmadan ve zarar görmeden kaynak işlemine hazır hale gelmesini sağlar. Ayrıca, parçaların kaynak sıcaklığına aynı anda ulaşması da önemlidir [39].

3.7. Farklı Ana Metallerin İndüksiyon Kaynağı

Farklı ana metallerin indüksiyonla birleştirmesi sırasında, farklı ısınma hızlarına sahip metal yüzlerde eşit ısıtma önemlidir. Bu amaçla, indüksiyon bobin dizaynı, birbirinden farklı ısınma sürelerini dikkat almak zorundadır. Bu etki, özellikle iletken ve iletken olmayan metallerin kaynağı sırasında belirgin hale gelir. Bu bağlamda, indüksiyon ısıtma bobinlerinin tasarımı, farklı ana metallerin özelliklerini ve ısınma davranışlarını dikkate alarak optimize edilmelidir. Bu yaklaşım, kaynak işleminin verimliliğini artırabilir ve sonuç olarak kaliteli birleşim noktalarının elde edilmesine katkıda bulunabilir [39].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Malzeme

Mühendislikte malzeme seçimi, birçok açıdan kritik öneme sahiptir ve bir tasarımın başarısı üzerinde doğrudan etkili olabilir. Bir tasarımın başarısı ve nihai ürünün kalitesi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, malzeme seçimi titizlikle yapılmalı ve tasarımın gereksinimlerine en uygun malzeme seçilmelidir.

Kaynaklama işleminde malzeme seçimi, birçok açıdan büyük öneme sahiptir. Bunlardan bazıları şu şekilde listelenebilir.

- **Uyumluluk ve Verimlilik:** Kaynak yapılacak malzemenin seçimi, kaynak işleminin başarılı olması için kritiktir. Malzeme seçimi, kaynak sürecinin verimliliğini artırır ve işlemin başarılı bir şekilde tamamlanmasını sağlar [40].
- **Dayanıklılık ve Performans:** Malzeme seçimi, kaynaklanmış bir parçanın dayanıklılığı ve performansı üzerinde doğrudan etkili olur. Doğru malzeme seçimi, kaynaklı parçanın mekanik özelliklerini, kimyasal dayanıklılığını ve diğer performans özelliklerini artırabilir [40].
- **Uygulama Koşullarına Uyum:** Malzeme seçimi, kaynaklı parçanın uygulama koşullarına uyumunu sağlar. Çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılan parçalar farklı koşullara maruz kalabilir ve bu nedenle kaynaklanacak malzemenin bu koşullara uyumlu olması önemlidir [40].
- **Ekonomik Faktörler:** Malzeme seçimi, kaynak işleminin maliyetini etkileyebilir. Uygun malzeme seçimi, işlem maliyetlerini minimize edebilir ve kaynak işlemi için gereken kaynak malzemelerinin maliyetini azaltabilir [40].
- **Kalite ve Güvenlik:** Yanlış malzeme seçimi, kaynaklı parçanın kalitesini etkileyebilir ve hatta güvenlik riskleri oluşturabilir. Özellikle endüstriyel veya ağır hizmet uygulamalarında, yanlış malzeme seçimi ciddi sonuçlara yol açabilir [40].

Sonuç olarak, malzeme seçimi kaynak işleminin başarısı ve kaynaklanmış parçanın özelliği üzerinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, doğru malzeme seçimi için dikkatli bir değerlendirme yapılmalı ve uygun malzeme seçilmelidir. Tez kapsamında seçilen dolgu metalleri ve ana metaller bu hususlar doğrultusunda seçilmiştir.

4.1.1. Dolgu Metalleri

Sert lehim erime derecesi 450 °C'nin üzerinde ve malzemelerin erime sıcaklığı altında gelen ilave metalleri kullanarak ısıtma yöntemiyle metalleri birleştirme işlemidir.

Sert lehimleme, metallerin erimeden ve 450°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kaynatılması için ek bir dolgu metalinin kullanılması işlemidir. 450°C'nin üzerinde eriyen dolgu metal, kaynak aralığına yayılarak kaynatılacak metallerle birleştirilir, böylece sıkı bir bağ oluşturulur.

Bu tanım, sert lehimlemenin ana prensibini vurgular: ek dolgu metallerinin kritik rolü. Sert lehimleme sürecinde, doğru dolgu metalinin seçimi kaliteyi belirler. Dolgu metalinin seçiminde dikkate alınması gereken birkaç önemli faktör vardır [41].

- İşlem uygulanacak dolgu metalinin ergime ısısı, ana metal malzemenin değerlerini değiştirmemelidir.
- Lehim teli 450°C ve üzerindeki ısılarda erimeli ve ana metal olmalıdır.
- Lehim teli erime ısısı, metalinin erime ısısından en az 200°C ve üzerindeki değerlerde tutulmalıdır.
- Lehim teli, birleşme göstereceği metale ısıyı doğrudan vermelidir.
- Lehim teli özellikleri, uygulanacak sert lehim yöntemine uygun olmalıdır.

Sert lehim yöntemlerinde kullanılan kaynak tel metalleri, DIN 8513, TS 6274 gibi standartlarda sınıflandırılmıştır. Kaynak telleri genellikle alaşım eklenerek çeşitlendirilir ve kullanılır. Bu, istenilen mekanik özellikleri elde etmek için yapılan bir uygulamadır. Özellikle lehimleme işlemlerinde, alaşım eklemek lehimin akışkanlığını, dayanıklılığını ve diğer özelliklerini iyileştirebilir.

Lehim dolgu metalleri farklı baz metal alaşımları üzerine kurulmuştur. Gümüş (Ag) ve bakır (Cu) tabanlı dolgu metalleri oldukça yaygın olarak kullanılır çünkü bu metallerin alaşımları lehimleme işlemlerinde istenen özellikleri sağlayabilir. Örneğin, gümüş bazlı dolgu metalleri elektriksel iletkenliklerinin yüksek olması nedeniyle elektronik uygulamalarda tercih edilirken, bakır bazlı dolgu metalleri genellikle yüksek ısı iletkenliği nedeniyle ısı transfer uygulamalarında kullanılır. Bu seriye ayrılmış dolgu metalleri, farklı uygulamalara uygun çeşitli özelliklere sahiptir. Dolgu metalleri, Ag, Cu, Al, Au, Ni ve Mn gibi 10'dan fazla seriye ayrılabilir. Bu alaşımlar arasında, gümüş ve bakır alaşımlı lehimler en çok tercih edilendir [42]. Günümüzde,

rekabetin artması sebebiyle, gümüş ve bakır alaşımlı lehim tellerine olan ihtiyaç giderek artış göstermiştir. Kadmiyum içeren gümüş telleri, maliyet ve performans sebebiyle tercih edilir hale gelmiştir [43].

Tablo 4.1: Dolgu Metalleri Kimyasal Özellikler Tablosu.

Malzeme	Erime Sıcaklığı C°	C%	Ag%	Cu%	Al%	Zn%	Pb%	Sn%
Ag309	605- 765	40,41	19,19	-	-	25,85	-	-
RBCuZn-A	885- 940	-	-	60,1	0,001	39,35	0,005	0,54

Hazırlanılan proje kapsamında dolgu metali olarak gümüş ve pirinç alaşımlı kullanılmıştır. Tablo 4.1 de kimyasal özellikleri ve erime sıcaklıkları gösterilmiştir. Kaynak tellerine ait bilgiler aşağıdaki gibidir.

Gümüş teli genellikle saf kaynak lehim tel metali olarak kullanılmaz, en pahalı dolgu metallerindendir. Bu yüzden genellikle karışım yapılarak kullanılır. Gümüş içeren dolgu metalleri, birçok ana malzemeye uyumlu özellikler sergiler. Bu alaşımların birleşim yüzeyinin mekanik, fiziksel ve iletkenlik özellikleri oldukça iyidir. Kadmiyum içeren gümüş sert lehim dolgu metalleri, düşük sıcaklıklarda sert lehim yapma imkanı sağlar ve kapiler özelliği, akıcılığı ve boşluk doldurma özelliği yüksektir. Çeliklerin, temper dökme demirlerin, bakır, nikel ve alaşımlarının birbiriyle sert lehiminde kullanılır. Bronz ve pirinç malzemelerde yüzey kaplama amacıyla kullanılmaya uygundur. Boru ve boru sistemleri imalatında, otomotiv, savunma, havacılık endüstrisinde kullanılan her türlü boru bağlantısında tercih edilir. Elektrik iletkenliği özelliklerinden dolayı elektrik elektroniği sektöründe geniş kullanım alanına sahiptir. Kesme kater kalemi gibi sert metallerin birleştirilmesinde çok iyi sonuçlar verir. Çeliklerin, paslanmaz çeliklerin, dökme demirlerin sert lehiminde dekapan olarak kullanılır. Bu dekapanlar, sert lehim öncesi yüzeyi temizler ve sert lehim esnasında ilave telin malzemeye yayılmasını sağlar. Sert lehim sonrasında oluşan dekapan artığı mekanik olarak sıcak suda fırçalanarak, parçalar sıcakken suya daldırılarak veya özel solüsyonlar kullanılarak temizlenebilir.

Pirinç dolgu malzemesi, az oranlarda silikon ve kalay içeren özel bir alaşımdan elde edilmiştir. Bu telin erime noktası yaklaşık olarak 890°C'dir. Kalay, telin akışkanlığını,

gücünü ve korozyon direncini artırırken, silikon ise buharlaşan oksijen ve çinkoyu etkili bir şekilde soğutarak gözenekliliği azaltır ve tatmin edici mekanik özellikler sağlar.

Pirinç dolgu metalinin bazı avantajları şunlardır:

- İletkenlik: İçerdiği bakır sayesinde yüksek bir iletkenlik özelliğine sahiptir. Bu özellik, indüksiyon kaynak gerektiren uygulamalarda tercih edilmesine katkı sağlar.
- Korozyon Direnci: İçerdiği çinko ile paslanmaya karşı dirençlidir. Bu özellik, kaynak yapılan parçanın çevresel etkilere karşı daha dayanıklı olmasına yardımcı olabilir.
- İşlenebilirlik: İşlenmesi kolay bir malzeme olup şekil verme ve işleme işlemlerinde başarılıdır. Bu özellik, pirinç kaynak tellerinin çeşitli uygulamalarda kolayca kullanılmasını sağlar.

Pirinç kaynak telleri, genellikle metal birleştirme, bakır alaşımları üzerinde kaynak işlemleri, kaplama ve dekoratif metal işlemlerinde kullanılır. Bu özellikler, pirinç kaynak tellerinin geniş bir uygulama alanına sahip olmasını sağlar.

Pirinç alaşımlı kaynak telleri, havalandırma sistemlerinden otomotiv ve tarım makinelerinin kaporta ve boru birleştirmelerine, bisiklet ve motosiklet kadro bağlantılarına, kırık matkap uçlarının tamirine, dekorasyon ve metal mobilya üretimine, elektrik panoları, hastane ekipmanları ve mobilyalarının üretimine, makine hidrolik-pnömatik ekipmanlarına ve tekstil makine imalatına kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır.

Maliyet açısından bakıldığında 2024 yılı fiyatları baz alındığı zaman pirinç alaşımlı kaynak telinin kilogram fiyatı 15 Euro iken Gümüş alaşımlı kaynak teli fiyatı 275 Euro civarlarındadır.

4.1.2. Ana Metaller

Çelik, demirin karbon ile alaşımıdır. Çelik, endüstride geniş bir kullanım alanına sahiptir ve otomotiv endüstrisi, enerji, makine imalatı, savunma sanayi, kesici uç takımları gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılır.

Bu çalışmada indüksiyon kaynak işlemi yapılan iki çelik malzemeden birincisi dikişsiz, soğuk çekilmiş hassas çelik borular olarak bilinen 235+N çeliğidir. Bu çelik

otomobil, havacılık, traktör, mobilya, hidrolik ve bağlantı ekipmanları kullanılan malzeme çeşitidir. Borular, belirli bir yüzey hassasiyetine sahip standartlarla belirlenmiş ölçüm aralığındadır. [44].

Dikişsiz, dışı haddelenmiş metal borular, özellikle boyutsal ölçülerine bakıldığı zaman hassas toleranslara sahiptir. Bu hassasiyet, boru üretiminden sonraki "soğuk çekme" adı verilen proses ile oluşturulur. Bu yöntem sırasında dış yüzeyi önemli ölçüde kalibre eder. Dikişsiz boruların üretim yöntemi daha karmaşıktır ve dolayısıyla dikişli borulara göre daha maliyetlidir [45].

Tablo 4.2’de E235+N malzemesi için alınan malzeme sertifikası tablo halinde gösterilmiştir.

Tablo 4.2: EN10305-1 E235 (DIN 2391) Malzeme Sertifikası.

Malzeme	Akma Dayanımı N/mm2	Çekme Dayanımı N/mm2	Uzama Miktarı(A5) min. %	C%	Si%	Mn%	P%	S%
E235+N								
Mekanik Özellikler	305	416	44					
Kimyasal Özellikler				0,09	0,14	0,44	0,009	0,005

İndüksiyon kaynak işlemi yapılan iki çelik malzemedan ikincisi Otomat Çeliği olarak bilinen 11SMnPb30+C çeliğidir. 11SMnPb30 otomat çeliği, 15SMn13'e benzer özelliklere sahiptir ancak daha iyi işlenebilirlik sunar. Kaliteli yüzey istenen hassas parçaların yapımında kullanılmaz. Bu otomot çeliği, düşük karbon içeriğine sahip olup CNC ve evrensel tezgahlarda işlenir. Serbest işleme terimi, işlenebilirliği artırmak için diğer özelliklerin bir kısmından ödün verildiğini ifade eder. Malzemenin yüksek hızlarda işlenebilmesi ve talaşların kısa olması, robotlaştırılan endüstrilerde rekabeti artırır [46].

Tablo 4.3: 11SMnPb30+C Malzeme Sertifikası.

Malzeme	Akma Dayanımı MPa min	Çekme Dayanımı Mpa min	Uzama Miktarı(A5) min.%	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Pb%
11SMnPb30+C									
Mekanik Özellikler	520,8	545,5	14,3						
Kimyasal Özellikler				0,076	0,008	0,125	0,048	0,29	0,25

Otomat çeliğinin işlenebilirliği destekleyen başlıca elementler Tablo 4.3'te görüldüğü gibi kükürt ve kurşundur. Kurşunun işlenebilirlik açısından olumlu etkisi olup hız ve yüzey açısından verimlilik artırır. İşlenme esnasında kullanılan kesici uç ve takımların ömrünü uzatıp maliyet açısından da önemli rol oynamaktadır.

4.2. Malzemelerin Deneysel Çalışma Öncesi Hazırlığı

Malzemelerin kaynak öncesi temizliği, başarılı ve sağlam bir kaynak bağlantısı oluşturmak için son derece önemlidir. Kaynak öncesi temizlik işlemi, kaynak bölgesindeki kirlilikleri, yabancı maddeleri ve kontaminasyonu gidermeyi amaçlar. Malzemelerin kaynak öncesi temizliği için genel olarak izlenen adımlar şu şekildedir.

Yüzey Temizliği: Kaynak yapılacak malzemenin yüzeyi, yağ, gres, kir, pas, boya kalıntıları gibi tüm yabancı maddelerden arındırılmalıdır. Bunun için solventler, yağ alma makineleri, kumlama veya zımparalama gibi yöntemler kullanılabilir.

Oksitlenmiş Tabakanın Giderilmesi: Metal yüzeylerde oluşan oksitlenmiş tabaka kaynak işlemi için uygun değildir. Bu tabakanın giderilmesi için özel çözücüler, asitleme işlemi veya mekanik temizlik yöntemleri kullanılabilir.

Hassas Temizlik: Özellikle hassas kaynak uygulamalarında, yüzeyin toz, parçacık ve diğer kontaminasyonlardan tamamen arındırılması gerekir. Bu amaçla vakumlu temizlik, gaz altı temizlik veya ultrasonik temizlik gibi yöntemler kullanılabilir.

Kaplama Giderme: Kaynak yapılacak malzemenin üzerinde kaplama varsa (örneğin, boyalar, koruyucu kaplamalar), bu kaplamaların uygun şekilde giderilmesi gerekir. Kaplamaların kaynak işlemine uygun olmadığı durumlarda, özel çözücüler veya mekanik yöntemler kullanılabilir.

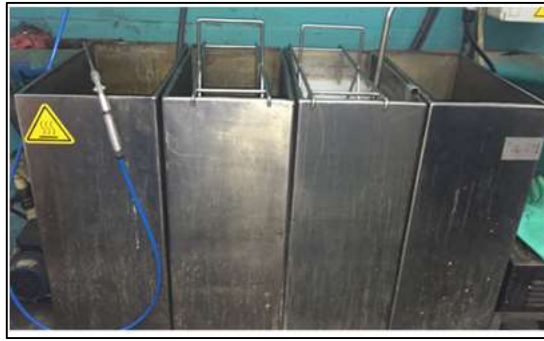
Bağlantı Parçalarının Temizliği: Kaynak yapılacak parçaların yanı sıra kaynak ekipmanları da temizlenmelidir. Elektrotlar, kaynak tabancaları, kaynak teli besleme sistemleri ve diğer ekipmanlar, yabancı maddelerden arındırılmalı ve uygun şekilde hazırlanmalıdır.

Kaynak öncesi temizlik işlemi, kaynak bağlantısının kalitesi ve dayanıklılığı üzerinde doğrudan etkili olabilir. Bu nedenle, kaynak işleminden önce malzemelerin ve ekipmanların titizlikle temizlenmesi büyük önem taşır.

4.2.1. Yıkama

Ana metal malzemesi olan EN10305-1 E235 çelik çekme borular, uzun boyutları nedeniyle uzun dolap şeklindeki makinelerde yıkanmaktadır. Yıkama sıvısının hazırlanması için kullanılan suya %10 oranında kimyasal sıvı (elmaclean-110) ilave edilir. Yıkama makinesindeki suyun sıcaklığı 70°C'ye ulaştığında, borular yıkama işlemine hazır hale gelir.

Yıkama işleminden sonra, kurutma işlemi son derece önemlidir. İyi bir kurutma yapılmadığı takdirde, tekrar oksitlenme oluşabilir.



Şekil 4.1: Ultrasonik boru yıkama cihazı.

İkinci ana metal malzemesi olan otomat çelikleri talaşlı imalatta üretildikleri için kesme yağlarına maruz kalıyorlar. Kaynak öncesi bu metallerinde hem talaşlarından arındırılması hem de kesme yağlarından arındırılması için ultrasonik yıkama makinalarında ekstra suya ses dalgası verebilen özellikte olmasına dikkat edilmelidir. Ultrasonik yıkama, girintili çıkıntılı ve erişimi zor yüzeyler için en etkili temizleme ve yağ alma yöntemidir. Bu işlemde, temizlenmesi gereken ürün bir sıvı içine konur ve

sıvının bulunduğu kabın içine ultrasonik ses dalgaları gönderilerek yıkama gerçekleştirilir.

Burada da kurutma çok önemli olduğu için metaller yıkandıktan sonra kurutma sepetine konularak kurutulur, sert lehimleme işlemi öncesine hazırlanır.



Şekil 4.2: Ultrasonik yıkama cihazı.

4.2.2. Boraks Hazırlaması

Sert lehimleme öncesi, metal yüzeylerdeki kir ve kalıntıların temizlenmesi gerekmektedir. Sert lehim işlemi sırasında, ısıya maruz kalacak yüzeylere uygulanarak birleştirme yüzeylerinin kolayca birleşmesine yardımcı olur.



Şekil 4.3: Karışım kabı.



Şekil 4.4: Sıvı Kabı.

Boraks tozu ve saf su birebir oranında karıştırılır. Karışım kabına azar azar su ilave edilerek karıştırılmalıdır. Karışım, istenen yoğunluk seviyesine ulaştığında kullanıma hazır hale gelir.

4.3. Metalografi Numune Hazırlama

Numune hazırlama süreci, ana parçanın özelliklerini taşıyacak şekilde yapılandırılmalı, tüm yapısal elementleri korumalı, yüzeyde çizik veya deformasyon olmamalı, yabancı madde içermemeli, düz, pürüzsüz ve yansıtıcı bir yüzeye sahip olmalı, en uygun maliyeti sağlamalı ve en önemlisi, tüm bu adımlar %100 tekrarlanabilir olmalıdır. Metalografik numune hazırlamadaki temel amaç, numunenin gerçek yapısını metal, seramik, sinterlenmiş karbür veya diğer katı malzemelerden oluşsa da ortaya çıkarmaktır.

4.3.1. Numune Kesme İşlemi

Kesme işlemi, numuneye morfolojik ve kimyasal olarak en az zararı verecek şekilde yapılmalı, malzeme hacminin asgari olacak şekilde korunmasına özen gösterilmelidir. Bundan dolayı, kesme esnasında işlem yapılacak parçaya sıvı soğutma gereklidir. Kullanılan soğutma sıvısı paslanmayı önler, kesme testeresi ile olan sürtünmeye etki eder ve numunenin ısınmasına engel olur.

Mengenenin üzeri ve kızıklara hortum ile su tutarak temizlendikten sonra şekildeki gibi motor soğutma kanatlarının arasına sıkıştırılmalıdır. Böylece kesim esnasında kesme taşının üzerine su dökülür ve soğutma sağlanmış olacaktır.

4.3.2. Bakalite Alma

Bakalite alma, zımpara işlemini kolaylaştırmak, mikroskop incelemede en iyi yüzeye ulaşmak ve işçi sağlığı ve güvenliği açısından önemlidir. Deney parçaları ebat ve alan olarak uygunsa, bakalite alınmadan mikroskopta bakılabilir ve metalografi için inceleme yapılabilir.

Bakalite alma işlemi öncesi kesilen numune keskin köşe ve çapaklarından arındırılmalıdır. Cihazın pres silindirlerinin temizliğinden emin olunmalıdır. Parlatılacak olan yüzey alta gelecek şekilde konulmalıdır.

4.3.3. Zımparalama ve Parlatma

Parlatma işlemi, yüzeyde bulunan girinti ve çıkıntıları eşit seviyeye getirerek, ışığı etkili bir şekilde algılayan bir alan oluşturmaktır.

Bu çalışmada da metalografik numune için ilk olarak zımparalama gerçekleştirilmiştir. Her zımparalama prosesi için bir bozuk yüzey kademesini temizlemek amacıyla yapıldığı her işlemde bozuk yüzeyi temizlemeyi giderecek bir zımpara seçilmiştir. Islak zemine bastırılarak numuneden kaldırılan metal parçaları, düzlemden uzaklaştırılmalıdır. Bu işlem yapılmazsa aşındırma ile kaldırılan metal partiküller zemine yapışır ve numune yüzeyinin bozulmasına yol açar. Bu olumsuzluğu önlemek için su ilavesi yapılır. Zımparalama süresince yapılan her işlem bir önceki aşamada meydana gelen kademelerin yüksekliği incelenmiştir. Zımpara kullanımındaki 600 mesh ölçüden başlanıp sırasıyla 1200 mesh lik zımpara kâğıdı kullanılır. Parlatmanın amacı temiz, net, kademesiz düzgün, çiziksiz ve ayna görünümünde bir görünüm oluşturulmasıdır. Kaba parlatmada genellikle malzemenin sertliğine göre yapılır.

4.3.4. Mikroskop

Mikroskoplar, gözle görülemeyen küçük nesneleri büyüterek incelemeye yarayan optik araçlardır. Yüksek kaliteli mikroskoplar geniş bir yelpazede farklı uygulama alanlarına hitap eden çeşitli modellerle bilim, araştırma, eğitim, endüstri ve sağlık sektörlerinde kullanılmaktadır

Bu mikroskoplar, özellikle optik kaliteleri, dayanıklılıkları ve kullanım kolaylıklarıyla tanınır. Yüksek çözünürlük ve netlik sunan optik sistemleriyle, mikroskobik düzeyde detaylı incelemeler yapmak mümkündür. Bu özellikleri, araştırma laboratuvarlarından eğitim kurumlarına, endüstriyel tesislerden klinik laboratuvarlara kadar birçok farklı alanda kullanılmasını sağlar.

Meiji marka mikroskopları, yüksek kaliteli optik bileşenlerle birleştirilmiş dayanıklı ve hassas yapılarıyla tanınır. Metalografi çalışmalarında kullanılan önemli araçlardan biridir. Yüksek çözünürlük ve netlik sağlayan optik sistemleri sayesinde, metalografik numunelerin detaylı incelemesi için idealdirler. Metalografik numuneler, metal veya alaşımın kesitinden alınarak özel preparasyon yöntemleriyle hazırlanır ve daha sonra mikroskop altında incelenir.

4.4. Çekme Testi

Çekme testi cihazları, malzemelerin dayanıklılığını belirlemek için kullanılan önemli araçlardır. Bu cihazlar, bir malzeme üzerine uygulanan gerilme kuvvetini ölçmek

amacıyla tasarlanmıştır. Genellikle bir malzeme örneği, bir çerçeve, bir kuvvet sensörü ve bir ölçüm cihazı ile donatılmış bu test cihazları, malzemenin çekme dayanımını, elastik sınırlarını ve diğer mekanik özelliklerini belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Endüstride, araştırma laboratuvarlarında, kalite kontrol süreçlerinde ve malzeme mühendisliği uygulamalarında sıkça kullanılan çekme testi cihazları, farklı malzemelerin mukavemetini karşılaştırmak, malzeme tasarımını optimize etmek ve ürünlerin dayanıklılığını değerlendirmek için kritik bir rol oynarlar.

Bu tez kapsamında, BESMAK marka 500kN çekme testi cihazı kullanılmıştır. BESMAK 500kN serisi, kolon tipi yapıda rijit bir çerçeve ile tasarlanmış bir universal test cihazıdır. Bu cihaz, çekme, basma, bükme, sürünme ve döngüsel testler gibi birçok testi tüm hammaddeler ve bitmiş ürünler üzerinde gerçekleştirebilir.

Bu test cihazları, hassasiyet için tasarlanmış, dayanıklılık için üretilmiş ve değişen gereksinimlere cevap verebilmek için esneklik sunarlar. Ayrıca, kullanışlı çalışma yüksekliği ve ergonomik kontrolleri sayesinde operatörün üretkenliğini ve konforunu artırır. Canlı ekran, yazılım tuşları ve numune koruma özellikli uzaktan kumanda ünitesi gibi özellikler, test verimliliğini artırır ve operatör için daha iyi bir deneyim sunar.

Hassas yük hücresi sayesinde yüksek hassasiyetle yük ölçümü yapabilen bu cihazlar, farklı yük aralıklarına göre değiştirilebilen yük hücreleri ile daha doğru ve hassas ölçümler yapabilirler. Hemen hemen her uygulama veya endüstride test gereksinimlerini karşılamak için uygundur.

4.5. Yöntem

Yapılacak işlemin ilk aşaması olarak, indüksiyon makinasında amper değerlerini derece cinsinden hesaplamak için çalışmalar yapılmıştır. Orta fazlı indüksiyon makinasındaki sıcaklık değerleri amper ile orantılı olarak artmaktadır. Akım parametrelerine bakıldığında 20A, 30A, 40A olarak üç farklı parametre mevcuttur. Yüksek fazlı indüksiyon makinasında ise 60A, 70A, 80A olmak üzere 3 farklı parametre bulunmaktadır. Kaynak parametrelerinin belirlenmesi için sert lehimlemede kullanılan ana metal ve dolgu metallerinin malzeme sertifikaları incelenmiş ve buna uygun olarak da ısı parametreleri belirlenmiştir. Malzeme

sertifikaları incelendiğinde Ag309 kalite için erime sıcaklığı 605°C-765°C, RbCuZn-A kalite için erime sıcaklığı 885°C-940°C olarak belirtilmiştir. Bu bağlamda Tablo 4.4 ve Tablo 4.5 kullanılan indüksiyon makinasında parametreler her iki dolgu metali içinde erime sıcaklığı aralıklarına yakın seçilmiştir. İndüksiyon makinasındaki parametreler sıcaklığı etkileyen önemli faktörlerdir. İki farklı dolgu metalinin kullanılması durumunda, amper değerleri değiştirilerek istenen ergime değerleri sağlanmıştır. Bu çalışmalar, kaynak işlemi için gerekli olan doğru parametrelerin belirlenmesi ve istenen sonuçların elde edilmesi için önemli adımları oluşturmuştur.

Tablo 4.4: Amper Sıcaklık Dönüşüm Tablosu.

8sn	60 Amper	70 Amper	80 Amper
RbCuZn-A	820°C	880°C	930°C

Tablo4.5: Amper Sıcaklık Dönüşüm Tablosu.

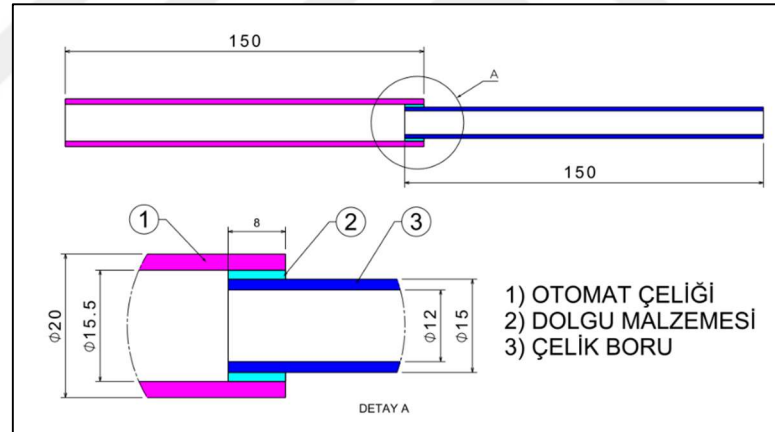
8sn	20 Amper	30 Amper	40 Amper
AG309	580°C	630°C	690°C

Tablo 4.4 ve Tablo 4.5 de görüldüğü gibi, farklı amperlerde indüksiyon tezgâhı çalıştırılarak her iki dolgu metali için 3 farklı sıcaklık değerleri belirlenmiştir. İndüksiyon makinasında 8sn sürenin referans alınmasının sebebi, cihazın bu süreden sonra sıcaklığı sabitlemesidir. Sıcaklık ölçümleri için DALI LT3 termal kamera cihazı kullanılmıştır. Şekil 4.5 de görüldüğü gibi Tablo 4.4 ve Tablo 4.5'teki değerler termal kamera ile ölçülerek sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Bu cihaz, yüksek hassasiyetle sıcaklık değişimlerini algılayarak kaynak işlemi sırasında oluşan sıcaklık profillerini doğru bir şekilde ölçmeye ve görselleştirmeye olanak tanır. Bu sayede, farklı amper değerleri altında gerçekleştirilen kaynak işlemlerinin sıcaklık profilleri detaylı bir şekilde analiz edilerek, en uygun kaynak parametrelerinin belirlenmesine yardımcı olur.



Şekil 4.5: DALI LT3 termal kamera.

Şekil 4.6’da 3 no’lu E235+N çelik çekme boru malzemesi ile 1 no’lu 11SmnPb30+C malzemesine bindirme yöntemi ile birbirine sabitlenmiştir. Bu işlem, farklı özelliklere sahip malzemelerin belirli bir bağlantı noktasında farklı dolgu metalleri ile birleştirilmesini sağlayarak özel uygulamalarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Bu birleştirme işlemi, her iki malzemenin özelliklerinden faydalanarak, dayanıklı ve istikrarlı bir bağlantı sağlamak amacıyla yapılmıştır.



Şekil 4.6: Kaynatılan metallerin şematik görüntüsü.

Ana malzemeler, birleşme için 150mm boyunda işlenmiştir ve bindirmeli lehim için aralarında 0.25mm dolgu mesafesi boşluğu bırakılmıştır. Tüm kenarlarda keskin köşelerin oluşmaması için pah kırılmıştır. İlk olarak, ana malzemeler yıkama makinelerinde temizlenerek indüksiyon kaynağına hazır hale getirilmiştir.



Şekil 4.7: İndüksiyon kaynak aparatı.

İndüksiyon kaynağı işlemi için 0.25mm ve 8mm ölçülerinin sağlanması için tasarlanan aparat, Şekil 4.7 de görüldüğü gibi makineye akuple edilmiştir. Bu adımlar, kaynak işlemi için gerekli olan malzeme hazırlığını ve işlem koşullarını sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

İndüksiyon kaynak işlemi için önceden belirlenen proses parametreleri doğrultusunda, 18 farklı deney gerçekleştirilmiş ve her bir deneyde 3'er adet olmak üzere toplamda 54 adet numuneye sert lehimleme işlemi uygulanmıştır. Bu deneyler, çeşitli işlem koşullarının ve parametrelerin etkilerini incelemek ve en uygun kaynak prosedürünü belirlemek amacıyla yapılmıştır. Her bir numunenin kaynak işlemi, belirlenen parametreler doğrultusunda titizlikle gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu sayede, işlem koşullarının optimize edilmesi ve en iyi kalite ve dayanıklılığı sağlayacak prosedürlerin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Tablo 4.6: Dolgu Metalleri İçin Deney Tabloları.

AG309	580°C	630°C	690°C	RbCuZn-A	820°C	880°C	930°C
8Sn	DENEY1	DENEY4	DENEY7	8Sn	DENEY10	DENEY13	DENEY16
9Sn	DENEY2	DENEY5	DENEY8	9Sn	DENEY11	DENEY14	DENEY17
10Sn	DENEY3	DENEY6	DENEY9	10Sn	DENEY12	DENEY15	DENEY18



Şekil 4.8: Çok sarımlı dolgu metali.

0.85mm kalınlığındaki gümüş alaşımlı dolgu metal,    sarımlı bir tasarım kullanılarak  ekil 4.8 de görüldüğü gibi borunun kaynatılacak bölgesine yerleştirilir. Bu işlem, kaynak işlemi sırasında dolgu malzemesinin homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak ve istenen bağlantının oluşturulmasına yardımcı olmak için tercih edilir. Pirinç alaşımlı tel için tek sarımlı 1.6mm kalınlığında bir tasarım kullanılması, dolgu malzemesinin boru yüzeyine daha kolay ve etkin bir şekilde uygulanmasına olanak tanır. Bu sayede, kaynak işlemi sırasında daha sağlam ve dayanıklı bir bağlantı elde edilir.



Şekil 4.9: İndüksiyon bobin teli tasarımı.

Ana metal, işlem için hazırlanmış olan aparat veya tutucuya  elik 4.9'daki gibi yerleştirilir. Bu aşamada, numunenin stabil bir şekilde konumlandırılması sağlanır. Ana metalin üzerine gelecek olan diğer boru ana metali bindirildiği zaman aradaki 0.25mm dolgu boşluk mesafesi rijit olarak sağlanacaktır. Ana metalin doğru bir şekilde yerleştirilmesi, işlemin başarısı ve sonuçların kalitesi için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, numunenin istenen konumda sabitlenmesi, kaynak işlemi sırasında istenmeyen hareketlerin  nlenmesine yardımcı olur ve sonuçların doğruluğunu artırır. Bu nedenle, ana metalin aparat veya tutucuya doğru bir şekilde yerleştirilmesi, kaynak işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi için önemlidir.



Şekil 4.10: Boraks malzemesinin boru metaline uygulaması.

İndüksiyon birleştirme esnasında, ana metal ve kullanılacak dolgu metalinin paslanmaya karşı önlenmesi ve dolgu malzemesinin istenen yüzeye daha kolay birleşmesi için Şekil 4.10 da görüldüğü üzere kaynatılacak bölgeye dekapan sürülür. Dekapan, genellikle bir lehimleme veya kaynak işleminde kullanılan bir tür akıştırıcıdır. Bu madde, yüzeylerdeki oksit tabakalarını temizler ve erimiş dolgu malzemesinin daha kolay akmasını sağlar. Ayrıca, dekapan, ana metal ve dolgu malzemesi arasındaki kimyasal bağın güçlenmesine ve daha sağlam bir bağlantı oluşturulmasına yardımcı olur. Bu işlem, kaynak prosedürünün başarılı olması ve sonuçların kalitesinin artırılması için önemlidir.

Boru ana malzemesi, aparata takılarak işlem için hazırlanır. Bu aşamada, borunun ana malzeme aparata doğru yerleştirilmesi sağlanır. Dolgu metalinin homojen dağılması için 8mm düzlük ile 0.25mm mesafe arasında hassas bir konumlandırma sağlanır. Bu ölçüler, birleştirme işlemi sırasında numunenin istenen konumda ve mesafede olmasını sağlayarak işlemin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırır. Bu şekilde, birleştirme işlemi için gerekli olan sabitlik ve hassasiyet sağlanmış olur.



Şekil 4.11: İndüksiyon ısıtma.

İstenen sıcaklık ve sürede sert lehimleme işlemi gerçekleştirilmek üzere indüksiyon düğmesine basılır. Bu işlem, belirlenen parametreler doğrultusunda indüksiyon kaynağının çalışmasını sağlar. İndüksiyon makinası belirlenen proses parametrelerinde çalışarak numunenin ilgili bölgelerinde gereken sıcaklık ve süre koşulları oluşturulur. İndüksiyon kaynağı, elektromanyetik alanın oluşturulması ve malzemenin yerel olarak ısıtılması prensibine dayanır. Bu sayede, numunenin belirli bölgelerinde istenen sıcaklıkta lehimleme işlemi sağlanır. Bu işlem sırasında oluşan sıcaklıktaki kararlılık kullanılan bobin şekillendirmesine bağlı olarak birebir etki etmektedir. İşlem sonunda, numunenin birleştirme yüzeylerinde istenen bağlantı

sağlanmış olur. Şekil 4.11 de indüksiyon makinasının sert lehimleme prosesi görülmektedir.



Şekil 4.12: Kaynak sonrası kesilen numune görseli.

Sert lehimleme işlemi tamamlandıktan sonra metalografik numune hazırlama işlemine geçilir. Öncelikle sert lehimleme yapılan bölge kalacak şekilde diğer bölgeler bertaraf edilerek ön kesme işlemi yapılır. Daha sonra kesme makinasında Şekil 4.12 deki numuneyi elde etmek için mengene aparatına tam ortadan kesilecek konumda sabitlenir ve kesme işlemi gerçekleştirilir. Kesme mesafesi, bakalit cihazının kapasitesine uygun olarak belirlenir. Kaynak nüfuziyetinin doğru görüntülenmesi bu işlem çok önemlidir. Kesme işleminden sonra elde edilen numune geometrisi bakalit cihazına göre belirlenmelidir. Bu süreçte, doğru kesme teknikleri kullanılarak numunenin istenen boyutlara ve şekle sahip olması sağlanır.



Şekil 4.13: Bakalit cihazı.

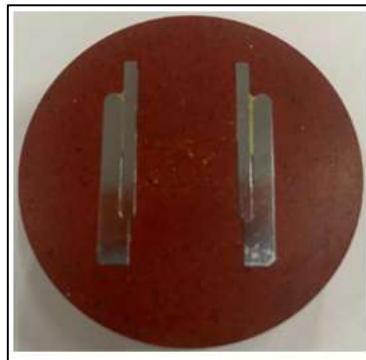
Kesim işlemi doğru bir şekilde tamamlandıktan sonra elde edilen numune, bakalit alma cihazına yerleştirilir. Bu aşamada, ölçüm yapılacak yüzey ile cihazın yüzeyi Şekil 4.13 de ki gibi alın altına birleştirilmelidir. Bu işlem sırasında numuneyi ters yerleştirirsek istediğimiz görüntüyü elde edemeyiz. Bakalit alma cihazına bakalit malzemesi eklenir. Hammadde miktarı, minimum 40 gram olacak şekilde ayarlanmalıdır. Cihazdan 13

1 dakika sonra çıkan numune, son haline ulaşır. Bu süreçte, numunenin doğru pozisyonunda ve miktarda bakalit ile işlenmesi, numunenin istenen sonuçları elde etmesi için kritik öneme sahiptir.



Şekil 4.14: Parlatma cihazı.

Bakalit numunenin parlatılması için, sırasıyla 600, 800, 1000 ve 1200 kalite kum zımparaları kullanılarak parlatma işlemi gerçekleştirilir. Bu işlem sırasında, zımpara Şekil 4.14 deki gibi saat yönünde dönerken, bakalit numunenin saat yönünün tersine doğru dairesel hareket yapması gerekmektedir. Bu yöntem, homojen bir parlaklık elde etmek ve yüzeydeki her türlü pürüzü gidermek için kullanılır. Dairesel hareketlerin düzenli ve dikkatli bir şekilde yapılması, parlatma işleminin etkinliğini artırır ve istenilen sonuçların elde edilmesine yardımcı olur.



Şekil 4.15: Parlatılmış numune.

Parlatma işlemi sırasında 3 mikron parlatma sıvısı kullanılmaktadır. Bu işlem sonucunda, mikroskopta görüntülenecek olan numunenin şekli, Şekil 4.15 de

görüldüğü gibi oluşturulur. Parlatma kalitesi ile görüntü sonuçları arasında doğru orantılı bir ilişki bulunmaktadır. Bu nedenle, numunenin parlatılması sırasında dikkatli olunmalı ve yüksek kalitede bir parlatma işlemi sağlanmalıdır, çünkü bu işlem, sonuçların doğruluğunu ve güvenilirliğini etkileyebilir.

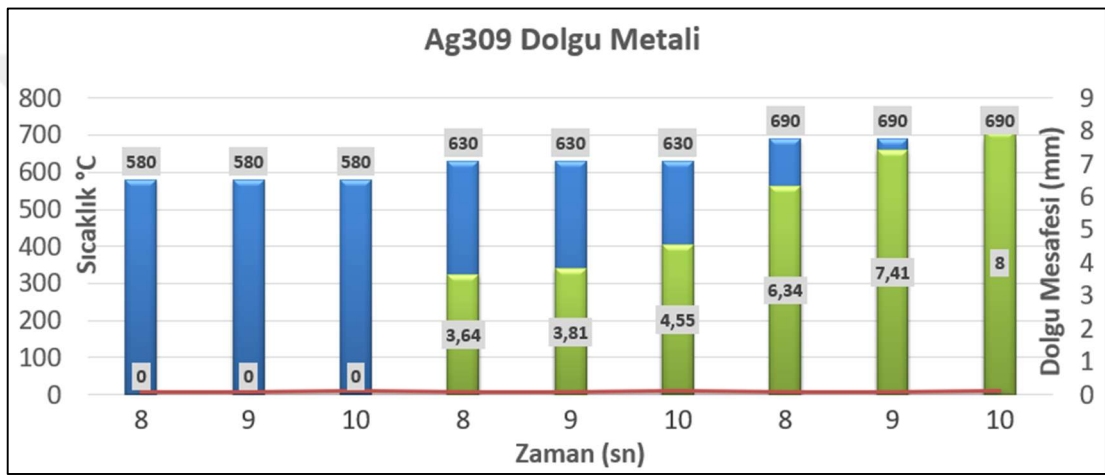
Mikroskop üzerinde yapılan incelemelerde, kaynak boyunun uzunluğu ve olası hatalar detaylı bir şekilde incelendi. Her bir numune için, kesintisiz kaynak boyu tek tek hesaplandı. Bu hesaplamalar, kaynak sürecinin doğruluğunu değerlendirmek ve kaynak bölgesindeki herhangi bir anormalliği belirlemek için yapıldı. Sonuçlar, numunelerin kalitesi ve kaynak işleminin başarısı hakkında önemli bilgiler sağladı. Bu sayede, kaynak prosedürlerinin optimize edilmesi ve potansiyel hataların belirlenmesi için gerekli adımlar atılabildi.

Diğer numunelerde ise çekme testleri yapıldı. Bunun için düzce üniversitesinde yaklaşık uzunluğu 300mm olacak şekilde numuneler hazırlanıp çekme testleri her bir numune için gerçekleştirildi.

5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1. Kaynak Kusurları İçin Kalite Seviyeleri

DIN ISO 5817 Standartının 3.3 ve 3.4 maddelerine göre, kaynak uzunluğundaki kusurlara %25'e kadar müsaade edilmektedir. Bu deneyde, 8mm uzunluğundaki bir kaynak için minimum 6mm uzunlukta düzgün kaynak mesafesi gerekmektedir.



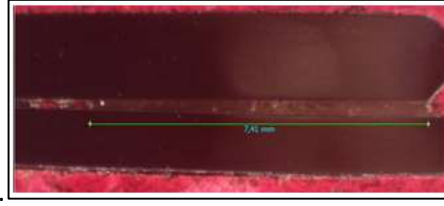
Şekil 5.1: Ag309 dolgu metalinin kaynak uzunluğu ölçüleri.

AG309 malzemesi için yapılan deneylerde, farklı sıcaklık ve süre koşullarında çeşitli sonuçlar elde edilmiştir. Kaynaklı birleştirme işlemi sonucunda 580°C 8, 9 ve 10 saniye sürelerinde yapılan kaynaklarda kaynak teli erimesi için yeterli değerlere çıkılamadığından ergime ve birleşme olmamıştır. Bu nedenle bu numunelerde herhangi bir metalografik inceleme yapılmamıştır.

630°C sıcaklıklardaki süreler bakıldığında zaman sırasıyla 3,64mm 3,81mm ve 4,55mm uzunlukta bir kaynak kalitesi sağlanmıştır. Çekme testlerinde ana metalden kopmasında rağmen, TS EN ISO 5817 standardına göre yeterli birleşmenin olmadığı tespit edilmiştir.

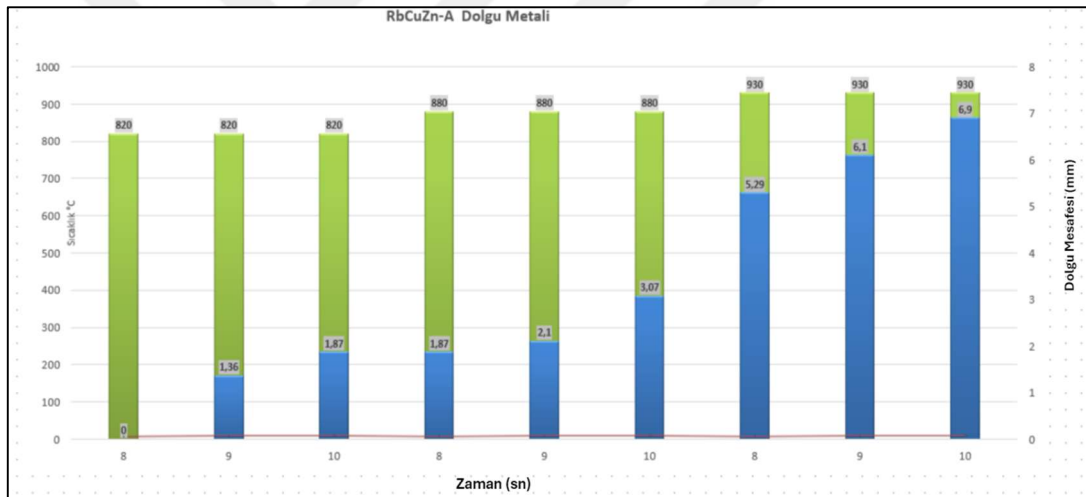
690°C sıcaklıklardaki yapılan denemelerde yeterli birleşme sağlanmış, istenen kaynak kalitesine ulaşılmıştır. Sürelere bakıldığında zaman sırasıyla 6,34mm 7,41mm ve 8mm

uzunlukta kaynak kalitesi sağlanmış, TS EN ISO 5817 standardına göre yeterli birleşmenin olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.2: Ag309 dolgu metali için kaynak mesafesi görseli.

Şekil 5.1 de 690°C 9sn indüksiyon birleştirmesi Ag309 dolgu metali ile yapılan kaynak bağlantısı görülmektedir. Yeterli birleşme mesafesi sağlanmış olup birleşme boyunca gözenek, boşluk, kaynak hatası ya da belirgin bir kusura rastlanmamıştır.



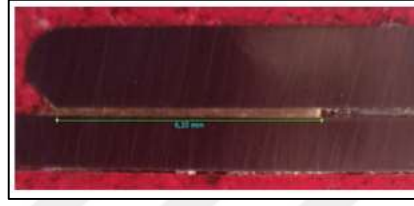
Şekil 5.3: Ag309 dolgu metalinin kaynak uzunluğu ölçüleri.

Deneylerde, RbZnCu-A için farklı sıcaklık ve süre koşullarında çeşitli sonuçlar elde edilmiştir. 820°C sıcaklıktaki denemelerde, 8sn süre için kaynak teli erimesi yeterli olmadığından ergime ve birleşme olmamıştır. Bu nedenle bu numunede herhangi bir metalografik inceleme yapılmamıştır. 9sn ve 10 sn sürelerindeki denemelerde sırasıyla 1,36mm ve 1,87mm uzunluğunda kaynak kalitesi sağlanmıştır. Çekme testlerindeki denemelerde numuneler boru metalinden kopmasına rağmen yeterli birleşmenin olmadığı tespit edilmiştir.

880°C sıcaklıklardaki süreler bakıldığı zaman sırasıyla 1,87mm 2,10mm ve 3,07mm uzunlukta bir kaynak kalitesi sağlanmıştır. Çekme testlerinde ana metalden

kopmasında rağmen, TS EN ISO 5817 standardına göre yeterli birleşmenin olmadığı tespit edilmiştir.

930°C sıcaklıklardaki yapılan denemelerde 9sn ve 10sn sürelerinde yeterli birleşme sağlanmış, istenen kaynak kalitesine ulaşılmıştır. Sürelere bakıldığı zaman sırasıyla 6,10mm 6,90mm uzunlukta kaynak kalitesi sağlanmış, TS EN ISO 5817 standardına göre yeterli birleşmenin olduğu tespit edilmiştir. 8sn süre ile yapılan denemede 5,29mm uzunlukta kaynak kalitesi ile yeterli birleşme sağlanamamıştır.



Şekil 5.4: RbCuZn-A dolgu metali için kaynak mesafesi görseli.

Şekil 5.2 de 930°C 9sn indüksiyon birleştirmesi RbCuZn-A dolgu metali ile yapılan kaynak bağlantısı görülmektedir. Yeterli birleşme mesafesi sağlanmış olup birleşme boyunca gözenek, boşluk, kaynak hatası ya da belirgin bir kusura rastlanmamıştır.

5.2. Çekme Testi Sonuçları

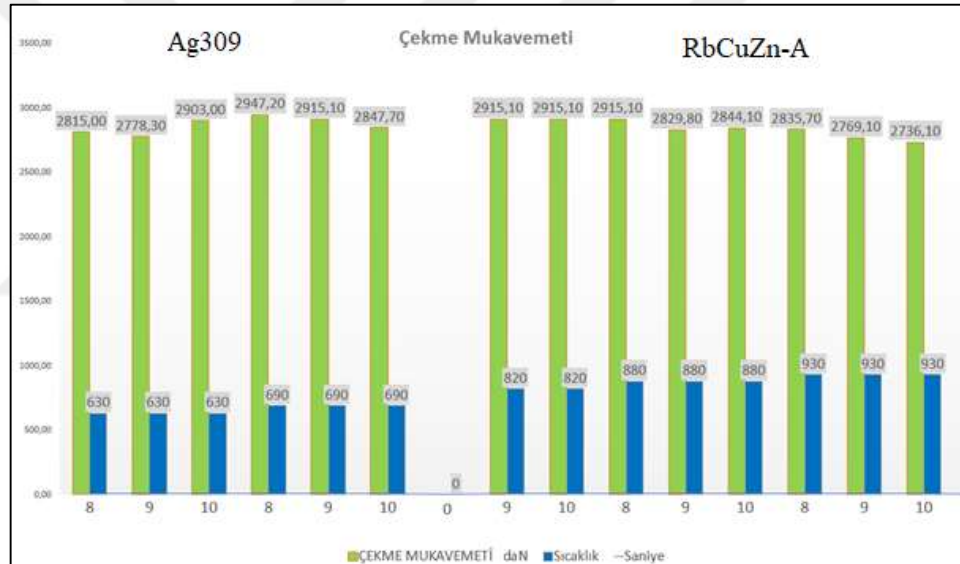
Brazing kaynaklarının performansını değerlendirmek ve bu bağlantıların uygulama koşullarına uygunluğunu belirlemek için çeşitli testler yapılır. Çekme testi, bu testlerden biridir ve malzeme mühendisliğinde önemli bir rol oynar. Şekil 5.3'te görüldüğü gibi kaynaklı bağlantıların dayanıklılığını, mukavemeti ve deformasyon davranışları için çekme testleri yapılmıştır.



Şekil 5.5: Çekme testi yapılmış numune görselleri.

Deney sonuçları, Ag309 ve RbZnCu-A dolgu malzemelerinin çekme mukavemetlerini sıcaklık ve süre değişkenleriyle ilişkilendirerek Tablo 5.3'te sunulmuştur. Gümüş alaşımlı dolgu metalinde 580°C için yapılan 3 adet numune ile pirinç alaşımlı dolgu metalinde sert lehimleme işlemi yapılan 820°C 8sn süre numunesinin ergimeleri olmadığı için çekme testleri yapılmamıştır. Her iki dolgu metalinin çekme kuvveti değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Kopmalar dolgu metalinden olmamış, boru ana malzemesi tarafından kopmalar gerçekleşmiştir. Ag309 kalite dolgu metali 690°C sıcaklıkta ve 8 saniye sürede 2947,20 daN hesaplanırken, RbCcZn-A kalite dolgu metali 820°C sıcaklıkta ve 10sn sürede 2915,10daN hesaplanmıştır.

Çekme testi laboratuvar ortamında DIN 6892-1 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Çekme testleri Düzce Üniversitesi DUBİT bünyesinde gerçekleştirilmiştir.

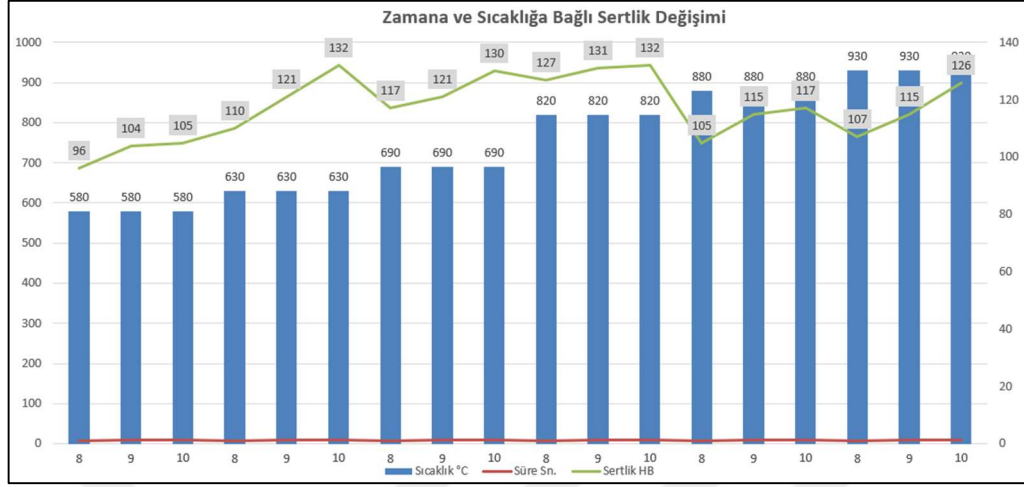


Şekil 5.6: Dolgu metalleri için çekme kuvveti değerleri.

5.3. Sertlik Ölçümleri

Kaynak sonrası ana metal ve komşu metalin özelliklerini değiştirebilir. Sertlik ölçümleri kaynağın kalitesini ve kaynak bölgesindeki mekanik özelliklerin uygunluğunu değerlendirmemizde yol gösterir. Bu çalışmada brinel ve vikers sertlik olmak üzere iki ayrı çalışma yapılmıştır.

5.3.1 Brinel Sertlik Ölçüm Sonuçları



Şekil 5.7: Boru metalinin sıcaklığa göre sertlik değerleri.

Tablo 5.4'te sert lehim yapılan parçaların brinel cinsinden değerleri ölçülmüştür. Sert lehimleme öncesi 180HB olarak ölçülen boruların sertlik değerinin kaynak sonrası yumuşadığı görülmüştür. E235+N metalinin düşük sıcaklıklarda yumuşadığı gözlemlenmiştir. Metal tarafta (10HB) değişkenlik gözlemlenmemiştir.

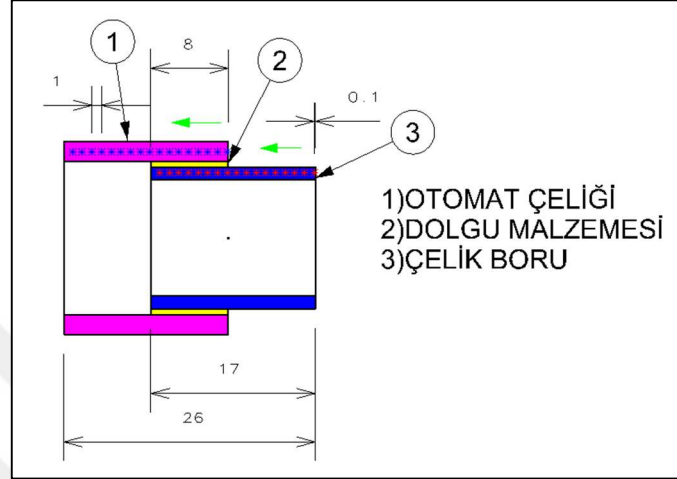


Şekil 5.8: Çekme testi sonrası boru malzemesinin brinell sertlik ölçümü.

Şekil 5.4 de sertlik ölçümü metodu görülmektedir. Bu çalışmada numunelerin hepsi ölçülüp genel bir grafik çıkarılmıştır. Mitutoyo HR 530 model ile brinel sertlik ölçümleri yapılmıştır.

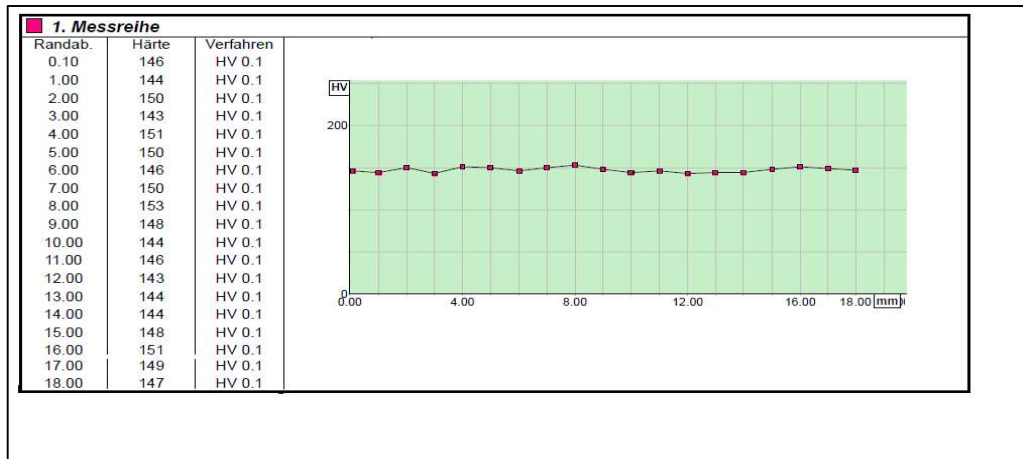
5.3.2 Vickers Sertlik Ölçüm Sonuçları

Aşağıdaki şekilde indüksiyon bölgesindeki mesafeler, çelik ve boru metali arasında, et kalınlığının ortasından geçecek şekilde, 1 mm aralıklarla ölçülmüş ve yeşil oklarla gösterilen yöne doğru alınmıştır.

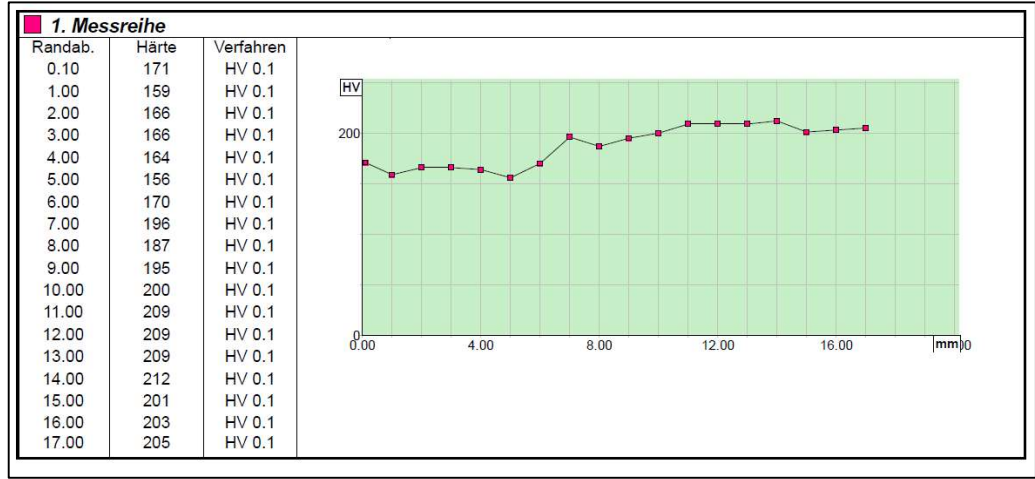


Şekil 5.9: Vickers sertlik ölçüm örnekleme görseli.

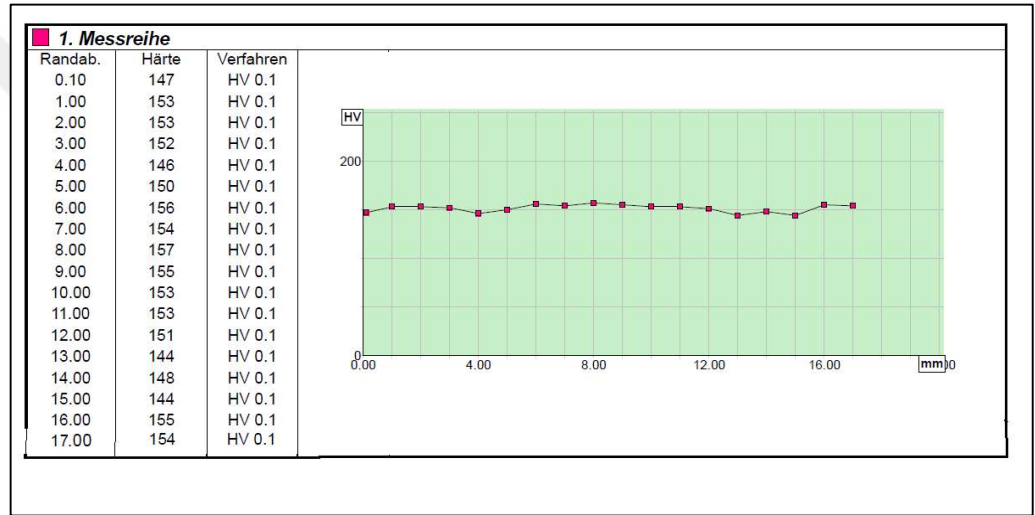
Bu çalışmada da en iyi kaynak seviyesi olan gümüş ve pirinç metallerinin ayrı ayrı sertlik ölçümleri çıkarılmıştır. Tablolar incelendiğinde sıcaklık farklarına rağmen boru malzemesinin sertlik değerlerinin daha stabil olduğu gözlemlenmiştir. Çelik malzeme tarafı ısıya daha fazla maruz kaldığı için gümüş denemesinde 30HV, pirinç denemesinde 60HV gibi farklar görülmektedir. Ayrıca tablo 5.8’de soğutmanın, sertlik grafiğinde sekizinci saniyeden sonraki değişimi de görülmektedir.



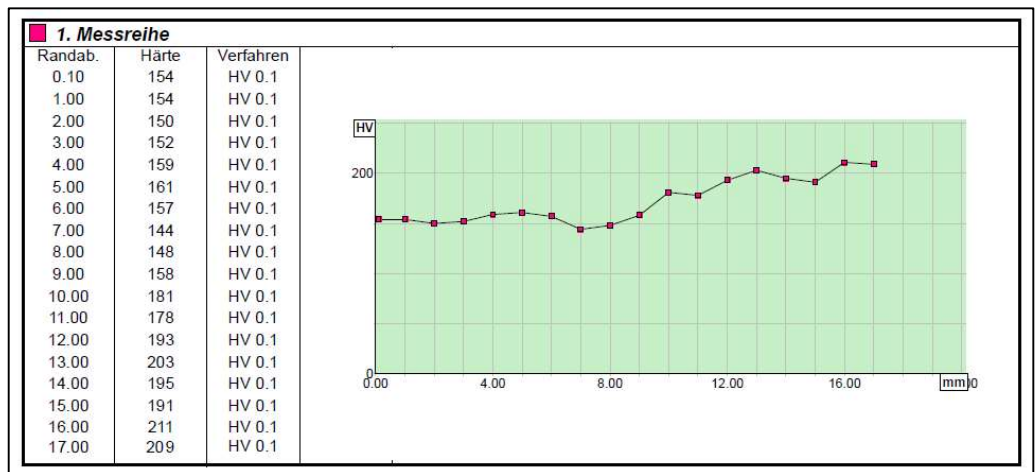
Şekil 5.10: 690°C’de gümüş kaynağının çelik borudaki sertlik grafiği.



Şekil 5.11: 690°C’de gümüş kaynağının otomat çeliği üzerindeki sertlik grafiği.



Şekil 5.12: 930°C’de pirinç kaynağının çelik borudaki sertlik grafiği.



Şekil 5.13: 930°C’de pirinç kaynağının otomat çeliği üzerindeki sertlik grafiği.

5.3.3 Optik Mikroskop Görüntüleri

Bu çalışmada hedeflenen, sert lehimleme yöntemiyle birleştirilen numunelerde oluşan fazların yapısal özelliklerinin ve kaynak boşluklarının detaylı bir şekilde incelenmesidir. Yapılan testlerde optik mikroskop kullanılmış ve görseller 200 kat büyütülmüştür. Elde edilen görsel verilere göre, gümüş ve pirinç dolgu metalleri kullanılarak yapılan kaynağın boru ve çelik ana metallerine olan geçiş bölgelerinde difüzyon izlenmemiştir. Ayrıca, dolgu metalinin morfolojik yapısında herhangi bir boşluğa rastlanmamıştır. Boru ana metali soğuk çekme olduğundan dolayı geçişlerin daha düzgün ve net olduğu gözlemlenmiştir. her iki numune görsellerinde de herhangi bir oksidasyon belirtisi görülmemiştir.



Şekil 5.14: 690°C’de gümüş tel ile birleştirilmiş borunun optik görüntüleri.



Şekil 5.15: 690°C’de gümüş tel ile birleştirilmiş çelik metalin optik görüntüleri.



Şekil 5.16: 930°C’de pirinç tel ile birleştirilmiş borunun optik görüntüleri.



Şekil 5.17: 930°C’de pirinç tel ile birleştirilmiş çelik metalin optik görüntüleri.

[Jadidi, 2013] tarafından fırın kaynak metodu ile gerçekleştirilen sert lehimleme deneyinde lehim boşluğunun 0.05mm'den fazla olduğu çekme numunelerinde mukavemetin azaldığı ve dolgu metalinde kopmaların meydana geldiği belirtilmiştir. Bu çalışmada ise 0.25mm boşluğa sahip denemelerde her iki dolgu metalinden de kopmalar görülmemiştir. Bu durum açıklamak için, kaynak işlemi sırasında ana metaller arasındaki boşluğun homojen bir şekilde dengelenmesini sağlamak amacıyla indüksiyon makinasına sabitlenen kalıbının kullanıldığı düşünülmektedir.

Önceki çalışmalara bakıldığı zaman indüksiyon işlemi sırasında ya da öncesinde ana metallere ön ısıtma yapıldığı görülmektedir. Bu tez çalışmasında ön ısıtma yapılmadan parçanın sert lehimleme işlemi yapılmış, sonuçlara bakıldığı zaman bir problem görülmemiştir.

Literatür araştırmalarına bakıldığında sert lehimleme işleminde gümüş dolgu metali ve gümüş alaşımları kullanılmıştır. Bu çalışmada gümüşe alternatif olarak pirinç alaşımlı tel kullanılarak çelik üzerindeki etkisinin birbirine yakın olduğu hesaplanmıştır. Gümüş alaşımlı dolgu metali pirinç alaşımına oranla yaklaşık 14 kat pahalı olduğunu gözönünde bulundurulduğunda, pirinç alaşımlı metalin maliyet açısından daha uygun bir alternatif olduğu görülmüştür.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan indüksiyon kaynak yöntemiyle E235+N çelik boruları ile 11SmnPb30+C malzemelerinin sert lehimlenmesi için Ag309 ve RbCuZn-A dolgu metalleri kullanılarak farklı sıcaklıklarda sert lehimleme işlemi gerçekleştirilmiş ve aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur.

- İki farklı ana metal malzemeye hem gümüş alaşımli hem de pirinç alaşımli dolgu metali ile sert lehimleme birleştirmesi başarıyla gerçekleştirilmiştir.
- Her iki dolgu metalinin de çekme mukavemeti değerlerinin standarda uygun olduğu ve dolgu metallerinden kopma olmadığı belirlenmiştir.
- Ag309 dolgu metalinin RbCuZn-A dolgu metaline göre daha düşük sıcaklıklarda sert lehimleme işlemi gerçekleştirebildiği gözlemlenmiştir.
- Ag309 dolgu metalinin RbCuZn-A dolgu metaline göre daha hatasız bir şekilde ana metale yayılma göstermiştir.
- Her iki dolgu metalinde çekme mukavemetlerinin birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir.
- Her iki dolgu metali içinde sıcaklık arttığı zaman kaynak nüfuziyetinin arttığı gözlenmiştir.

Bu çalışmadan sonra farklı pirinç alaşımli dolgu metallerinin paslanmaz ve titanyum ana metallerindeki etkileri incelenebilir. Bu konuda sınırlı olan yöntem ve proses parametreleri literatüre katkı sağlayabilir. Pirinç dolgu metalinin minimum 820°C ve üzerindeki sıcaklıklarda ergimesi nedeniyle, otomotiv sektöründe sert lehimleme işlemlerinde fırın kaynak yönteminin denenmesinin etkisi üzerine bir değerlendirme yapılması literatüre katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Yılmaz, S., Taştan, K., Ecek, N., & Çınar, E. (2017). Otomotiv sektörünün dünyadaki ve türkiye'deki değişimi. Ordu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi, 7(3), 685-695.
- [2] Vatan, C. (2002). Plastik malzemenin geri dönüşümü: otomotiv endüstrisinden örnekler (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [3] Demirtaş, R. (2024). Nitrürleme ve indüksiyon ile yüzey sertleştirme işlemlerinin talaşlı imalat parametrelerine etkilerinin incelenmesi.
- [4] Erden, S. (1991). Dikişli ve Dikişsiz Boru imalatı (Master's thesis, Anadolu University (Turkey)).
- [5] Yu Hua, Zhang Liangliang, Cai Fangfang, Zhong Sujuan, Ma Jia, Bao Li, Jiu Yongtao, Hu Bingli, Wei Shizhong, & Long Weimin. (2020). Microstructure and mechanical properties of brazing joint of silver-based composite filler metal. Nanotechnology Reviews, 9(1), 1034–1043.
- [6] TSE, Türk Standartları Enstitüsü, TS No: TS EN ISO 5817, Kabul Tarihi: 20.02.2007.
- [7] Merkel, S. W. (2021). Evidence for the widespread use of dry silver ore in the Early Islamic period and its implications for the history of silver metallurgy. Journal of Archaeological Science, 135.
- [8] Arribet-Deroin, D. (2019). Thomas Nicolas Dandridge Pete Cuivres, bronzes et laitons médiévaux / Medieval Copper, Bronze and Brass. Histoire, archéologie et archéométrie des productions en laiton, bronze et autres alliages à base de cuivre dans l'Europe médiévale (12 e -16'e siècles) / History, Archaeology and Archaeometry of the Production of Brass, Bronze and other Copper Alloy Objects in Medieval Europe (12 th -16 th Centuries).

- [9] Yazan, H. A., Akar, A. U., & Özmerih, L. (1974). Bakır ve İlgili Ürünlerin Kullanım Alanları. Scientific Mining Journal, 13(2), 43-47.
- [10] Özturan, M. B. (1997). Mühendislik Malzemelerinin Sert Lehimlenebilme Karakteristikleri (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [11] Uzun, H., (2002). “Sert Lehimleme Prensipleri”, Değişim Yayınları, S: 5-6:18-27:46-47: 236- 237, İstanbul.
- [12] Jacobson, D. M., (2005). “Principles of Brazing”, ASM international, 15, USA.
- [13] Miller, V.R., Schwaneke, A.E. (1978). Interfacial Compositions of Silver Filler Metals on Copper, Brass, and Steel. Welding Journal, 303-310.
- [14] Zaharinie, T., Huda, Z., Izuan, M. F. and Hamdi, M. (2015). Development of Optimum Process Parameters and a Study of the Effects of Surface Roughness on Brazing of Copper, Applied Surface Science, 331, 127-131.
- [15] Çınar, S. (2010). Bakır ve Alaşımlarının Sert Lehiminde Farklı Kimyasal Kompozisyonlara Sahip İlave Tellerin Bağlantının Mekanik ve Mikroyapı Özellikleri Üzerine Olan Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [16] Şafak, G., İrizalp, S. ve Kardelen Köroğlu, B. (2022). Ag içeren dolgu metalleri ile elde edilen bakır/pirinç lehim bağlantısının mikroyapısı ve mekanik performansı üzerine çalışma. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 24(72),1033 1047.
- [17] Sun H, Yu G, Chen S, Huang J, Yang J. Effect of Zn[sbnd]Al filler metals on the characteristics of the joint made by the high-frequency induction brazing of 304 stainless steel and 6A02 aluminum, Journal of Manufacturing Processes, 2021;68(Part A):961-972.

- [18] Zhang C, Ji H, Xu H, et al. Interfacial microstructure and mechanical properties of ultrasonic-assisted brazing joints between Ti-6Al-4V and ZrO₂. *Ceramics International*. 2020;46(6):7733-7740.
- [19] Jiang C, Chen H, Zhao X, Qiu S, Han D, Gou G. Microstructure and mechanical properties of brazing bonded WC-15Co/35CrMo joint using AgNi/CuZn/AgNi composite interlayers. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2018; 70:1-8.
- [20] Chen L, Chen H, Yang W, et al. Interfacial Microstructure and Mechanical Properties of 1Cr18Ni9Ti/1Cr21Ni5Ti Stainless Steel Joints Brazed with Mn-Based Brazing Filler. *Materials (1996-1944)*. 2022;15(19):7021.
- [21] Zhao P, Zhao L, Tan L, Xu Z, Wang L, Zhao X. Investigation on the induction brazing of copper-steel tubes with different coil structures. *Welding in the World: The International Journal of Materials Joining*. 2021;65(6):1181-1188.
- [22] Long WM, Zhang GX, Zhang QK. In situ synthesis of high strength Ag brazing filler metals during induction brazing process. *Scripta Materialia*. 2016; 110:41-43.
- [23] Zhang Y, Liu T, Zhang J, Wu C, Lu X, Ding W. Induction brazing BaCo_{0.7}Fe_{0.2}Nb_{0.1}O_{3-δ} membrane tubes to steel supports with Ag-based filler in air. *Journal of Membrane Science*. 2017; 533:19-27.
- [24] Luo Q, Xue S, Wu J. Influences of Sn on Properties of Ag-Based and Cu-Based Brazing Filler Metals. *CRYSTALS*. 2021;11(11):1403.
- [25] Fedorov V, Uhlig T, Wagner G. Joining of Aluminum and Stainless Steel Using AlSi10 Brazing Filler: Microstructure and Mechanical Properties. *AIP Conference Proceedings*. 2017;1858(1):1-5.
- [26] Wang G (1,2), Wu P (1), Su Y (1), et al. Brazing Ti-48Al-2Nb-2Cr alloys with Cu-based amorphous alloy filler. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2018;8(6).

- [27] Ma C, Xue S, Wang B. Study on novel Ag-Cu-Zn-Sn brazing filler metal bearing Ga. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016;688(Part B):854-862.
- [28] Cui B(1), Yan P(1), Liu Z(1), et al. Effects of Ge on microstructure evolution of the Cu-based filler metal and the Cu-20Sn-10Ti-1Ga/diamond brazing mechanism. *Welding in the World*. 2023;67(5):1283-1298-1298.
- [29] Sisamouth L, Hamdi M, Ariga T. Investigation of gap filling ability of Ag–Cu–In brazing filler metals. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010;504(2):325-329.
- [30] Xie B, Guo C, Zhang S, et al. The impact of brazing process on mechanical properties of S30408 stainless steel by experimental investigation. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020;175.
- [31] Du Xueming, Xifan Zou, Shangyu Huang, et al. Dissimilar Cu/Al tube joint by EMF-assisted brazing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018; 95:4039-4047. Accessed March 17, 2023.
- [32] Aytaş, H. A. (2021). Poliamid Malzemenin Mekanik Yüzey Gerilimini Değiştirerek Boya Tutuculuğunun Artırılması (Doctoral dissertation, Marmara Üniversitesi (Turkey)).
- [33] Hikaru Tajima, Hiroshi Masuda, Kotaro Umeda, Kyohei Furihata, Yasuyuki Miyazawa, 増田 博志, 宮沢 靖幸, 梅田 耕太郎, 田嶋 晃, & 降旗 恭平. (2023). Analysis of Wettability Behavior of Brazing Filler Metal Using In-situ Observation and Microstructure. *銅と銅合金*, 62(1), 205.
- [34] Gülenç, B. (2003). Difüzyon Sert Lehimlemesi ile Titanyum ve Düşük Karbonlu Çelik Malzemelerin Birleştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Makine Tasarım ve İmalat Dergisi*, 5(1), 22-28.
- [35] Zahid A, Zahid U. Influence of process parameters on the formation and quality of joining zones during induction brazing. *Eng Res Express* 2020:2.

- [36] Grozdanov, D. N., Luboslavov Hinov, N., & Vasilev, P. (2022). 3D Model of T-Shaped Inductor for Induction Brazing. 2022 8th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE), Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE), 2022 8th International Conference On, 1–4.
- [37] Yin Z, Sun F, Guo M (2018) The fast formation of Cu-Sn intermetallic compound in Cu/Sn/Cu system by induction heating process. Mater Lett 215:207–210.
- [38] Efteli Y ve Alan İ, Yüksek Frekans İndüksiyon Kaynak Makinesi Tasarımı, Elektrik- Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, 29 Kasım - 01 Aralık 2012 Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ege Üniversitesi, Bornova, İZMİR.
- [39] Moon, J., Kim, M.-G., Kang, O. H., Lee, H., & Oh, K.-Y. (2024). Automatic high-frequency induction brazing through an ensembled detection with heterogenous sensor measurements. Journal of Intelligent Manufacturing, 1–21.
- [40] Findik, F. (2009). Malzeme Seçimine Genel Bakış. Engineer & the Machinery Magazine, (591).
- [41] Yöntem, E. (2014). Demir ve Çelik Sektöründe Kullanılan Sert Dolgu Kaplamalarının Seçiminde Dikkat Edilmesi Gerekenler, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, Mayıs 2014
- [42] Xiong, H.P.; Li, H.; Mao, W.; Li, X.H. Reviews on lasted advances in brazing and soldering technologies. Trans. China Weld. Inst. 2011; 32, 108–112.
- [43] Wang, X.X.; Peng, J.; Cui, D.T.; Xue, P.; Li, H.; Hu, A.M.; Sun, G.Y. Research and application of silver-based brazing alloys in manufacturing industries: A review. Mater. Rep. 2018; 32, 1477-1485.
- [44] Karagöz, İ. (2007). Sementasyon Çeliklerinde Difüzyon Ve Sertlik Derinliğini Arttıracak Isıl İşlem Koşullarının İncelenmesi (Master's thesis, Marmara Üniversitesi (Turkey)).

[45] Deng, N., Lv, G., Li, W., & Chen, Z. (2024). Study of the UHPC–NC Interfacial Bonding Properties of Steel Tubes with Internally Welded Reinforcement Rings. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(13).

[46] Dere, M., & Filiz, İ. H. (2019). Otomat çeliğinin tornalama işleminde iş parçası çapı ve çıkıntı uzunluğunun yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin deneysel incelenmesi ve yüzey pürüzlülüğünün ANFIS ile modellenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(2), 675-686.

[47] JADIDI, A. (2013) Karbon Çelik Malzemelerin Fırında Sert Lehimlemesine Etki Eden Parametrelerin Deneysel Olarak Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İZMİR

ÖZGEÇMİŞ

2002 yılında Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Talaşlı Üretim Öğretmenliğinden mezun oldum. Özel sektörde çalışma hayatına başladım ve 22 yıldır Şafak Makine A.Ş. de çalışmaktayım.



TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR

[1] Aşçı E., Özçelik B., Apay S., (2023), “İndüksiyon Kaynağıyla E235+N ve 11SMnPb30+C Malzemelerinin Birleştirilmesinde Parametrelerin Kaynak Dikişi Mekanik Özelliklerine Etkisi” 11. Uluslararası Meslek Yüksekokulları Sempozyumu 05-07 Ekim 2023, Düzce/Türkiye 244-249 ISBN: 978-605-71407-8-4

[2] Aşçı E., Özçelik B., (2024), “E235+N ve 11SMnPb30+C Malzemelerinin İndüksiyon Kaynağıyla Birleştirilmesinde Kullanılan Ag309 ve RbCuZn-A Dolgu Metallerinin Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması” 8. GTÜ Lisansüstü Araştırmalar Sempozyumu 30-31 Mayıs 2024, Kocaeli/Türkiye.

