



Araştırma Makalesi

Journal of Innovative Engineering
and Natural Science

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jiens>

X3CrNiMo13-4 martenzitik paslanmaz çeliklerin fırında sert lehimleme prosesinde kullanılan koruyucu gaz karışımlarının yorulma performansına etkisi

Tanya A. Başer^a^aCoskunöz CKM Ar-Ge Merkezi, Bursa, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Geliş 13 Ağustos 2024

Düzeltilme 27 Kasım 2024

Kabul 11 Aralık 2024

Çevrimiçi mevcut

Anahtar Kelimeler:

Fırında sert lehimleme

Koruyucu gaz

Yorulma davranışı

Mikroyapı

ÖZET

Fırında sert lehimleme, enerji teknolojisi, havacılık, uzay ve otomotiv endüstrisi alanlarında teknik gelişim için öncü rol oynayan, düşük maliyetli bir birleştirme teknolojisidir. Sert lehimleme işleminin fırın içerisinde vakumlu ortamda değil, koruyucu gaz ve karışımlarının kullanılması durumunda, gaz kompozisyonunun birleştirilmiş parçanın yorulma performansını etkilediği bilinmektedir. Bu çalışmada, X3CrNiMo13-4 martenzitik paslanmaz çelik malzemelerin Au18Ni alaşımı ara bağlayıcı tabaka kullanılarak iki farklı koruyucu gaz ortamında (%93 Ar - %7 H₂ ve %100 H₂) fırında sert lehimleme özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada fırında sert lehimleme prosesi sırasında kullanılan farklı koruyucu gazların birleştirilmiş bölgenin yorulma dayanımı ile mikroyapı ve sertlik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca mikroyapı ve kırılma yüzeyleri üzerinden yapılan karakterizasyon çalışmaları, yorulma testi sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Yorulma testleri sonucunda %93 Ar - %7 H₂ koruyucu gaz altında 20.000 çevrimde $\sigma_{nom,max}$ değeri 250 MPa iken, %100 H₂ koruyucu gazı kullanıldığında bu değer 450 MPa'ya yükseldiği belirlenmiştir.

The effect of shielding gas mixtures in furnace brazing process on fatigue performance of X3CrNiMo13-4 martensitic stainless steels

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 Aug 2024

Received in revised form 27 Nov 2024

Accepted 11 Dec 2024

Available online

Keywords:

Furnace brazing

Shielding gas

Fatigue behavior

Microstructure

ABSTRACT

Furnace brazing is a low-cost joining technology that plays a leading role in technical development in the fields of energy technology, aerospace and automotive industries. It is known that the gas composition affects the fatigue performance of the joined part if the brazing process is not carried out in a vacuum in a furnace, but using shielding gases and mixtures. In this study, the furnace brazing properties of X3CrNiMo13-4 martensitic stainless-steel materials were investigated in two different shielding gas environments (93% Ar - 7% H₂ and 100% H₂) using the Au18Ni alloy interlayer. In the study, the effects of different shielding gases used during the furnace brazing process on the fatigue strength, microstructure and hardness properties of the joined zone were examined. In addition, characterization studies on microstructure and fracture surfaces were evaluated by comparing them with fatigue test results. As a result of fatigue tests, it was determined that while the $\sigma_{nom,max}$ value was 250 MPa in 20,000 cycles under 93% Ar - 7% H₂ protective gas, this value increased to 450 MPa when 100% H₂ shielding gas was used.

I. GİRİŞ

Günümüzde ileri birleştirme teknolojileri, çelik ve alüminyum gibi benzemez malzemelerin ya da farklı kalınlıklardaki alaşımların birleştirilmesini mümkün kılarak hibrit ve çoklu malzemeli parça üretimlerini

*Sorumlu yazar. Tel.: +90-5316403601; e-mail: tbaser@coskunoz.com.tr

sağlamıştır [1]. Böylelikle başta otomotiv endüstrisi olmak üzere, ağırlık azaltma çalışmalarında önemli başarılar sağlanmıştır. Otomotiv endüstrisinde ürünleri oluşturan detay parçalar çeşitli teknikler kullanılarak birleştirilirler. Bu amaçla yaygın olarak mekanik birleştirmeler, yapıştırma yöntemleri, kaynaklı birleştirmeler ve sert lehimleme yöntemleri kullanılmaktadır [2]. İleri birleştirme teknolojileri arasında hibrit ve çoklu malzeme üretimi için vakum lehimleme önem taşımaktadır. Günümüzde, vakum lehimleme veya koruyucu gaz lehimleme gibi gelişmiş fırın lehimleme teknikleri enerji üretimindeki bileşenler, havacılık, uzay uygulamaları ve otomotiv endüstrisi gibi ufuk açıcı uygulamalar için birleştirme teknolojisi olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Kaynak gibi diğer birleştirme teknolojileriyle kıyaslandığında sert lehimleme, çok çeşitli malzemelerin (örneğin farklı metallerin veya seramiklerin) nispeten düşük sıcaklıklarda ve hızlı işlem sürelerinde birleştirilmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca sert lehimleme, küçük ve karmaşık bağlantı geometrilerinin birleştirilmesini, tek bir adımda ve çok sayıda sert lehimin işlenmesine konvansiyonel kaynak yöntemlerine göre avantaj sunmaktadır [1, 3-5]. Sert lehimleme yöntemleri arasında fırında sert lehimleme karmaşık geometri parçaların birleştirilmesinde yoğunlukla tercih edilmektedir.

Fırında sert lehimleme, 900 °C'nin üzerinde sıvılaştırma sıcaklığına sahip sert lehim alaşımlarıyla vakum veya inert gaz ortamında, dekapan kullanılmadan yapılan bir birleştirme işlemidir [6]. Fırında gerçekleştirilen sert lehimleme prosesi havacılık ve enerji üretiminde, örneğin kompresör pervaneleri veya türbin parçaları gibi alanlarda tercih edilmektedir. Güçlü sert lehimlenmiş bağlantılar üretmek için hızlı ve düşük maliyetli bir yöntemdir [7]. Mekanik bir yük altında, dolgu metalinin ve ana malzemenin farklı elastik-plastik özellikleri ve ana malzemenin kısıtlayıcı etkisi nedeniyle sert lehimlenmiş bölgede karmaşık üç eksenli gerilmeler meydana gelmektedir. Bu yüksek gerilimli üç eksenlilik, bağlantı mukavemetinin kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Sert lehimleme sırasında tamamlanmamış boşluklar, gözenekler veya çatlaklar gibi sert lehimleme hataları oluşabilmektedir. Bu hatalar sert lehimleme bölgesinde gerilme konsantrasyon bölgeleri olarak hareket edebilir. Yorulma çatlakları bu bölgelerden başlayarak döngüsel mekanik yüklemeye altında kendiliğinden bozulmaya yol açabilmektedir [8].

Ergitmeli kaynak işlemlerinin koruyucu gaz altında gerçekleştirildiği durumlarda ergimiş metalin atmosferik kirlenmeye karşı korunması büyük önem taşımaktadır [9]. Özellikle ark kaynağında koruyucu gazların ark plazmasının oluşumu ve yapısı üzerinde belirgin bir etkisi vardır. İyonize gaz, ergimiş metaller, cürufur, buharlar ve gaz halindeki atomlar ve moleküllerden oluşan plazma, uygun koruyucu gaz uygulaması ile kontrol edilmektedir [10]. Fırında sert lehimleme prosesinde de fırın içerisindeki koruyucu gaz ve karışımı büyük önem taşımaktadır. Sert lehimlemede argon gazına hidrojen gazı ilavesi ana malzeme yüzeyindeki oksit filmini parçalayarak dolgu metalinin ıslatılmasını sağlamaktadır [11]. Bu nedenle sert lehimleme kalitesini iyileştirmek için koruyucu gaz seçimi büyük önem taşımaktadır. Açık literatür araştırmalarında fırında sert lehimleme ile paslanmaz çeliklerin birleştirildiği bazı çalışmalar bulunmaktadır. Friedrich-Wilhelm Bach ve ark. [12] paslanmaz çeliğin sert lehimlenmesi için bor ve fosfor içermeyen nikel bazlı dolgu metalleri kullanarak fırında sert lehimleme, Bach, Friedrich-Wilhelm ve ark. [13] paslanmaz çeliklerin sert lehimleme işlemi esnasındaki ıslatma yüzey aktivasyonunu ve vakumlu fırın sert lehimleme ve koruyucu gaz altında indüksiyon lehimleme ve Lugscheider [14] ve ark. ise dispersiyonla güçlendirilmiş alüminyum malzemeleri vakumlu fırın lehimleme ve koruyucu gaz altında indüksiyon lehimleme yöntemi ile birleştirmişlerdir. Benzer şekilde ülkemiz açık literatüründe yapılan araştırmalarda ise titanyum ve bakır çifti [15] ile titanyum ve düşük karbonlu çelik malzemelerin gümüş ara bağlayıcı [16] kullanılarak indirgeyici ortamda fırında sert lehimleme ile birleştirildiği çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda genellikle lehimli malzeme dayanımları kesme-makaslama testleri ile belirlenmeye çalışılmıştır.

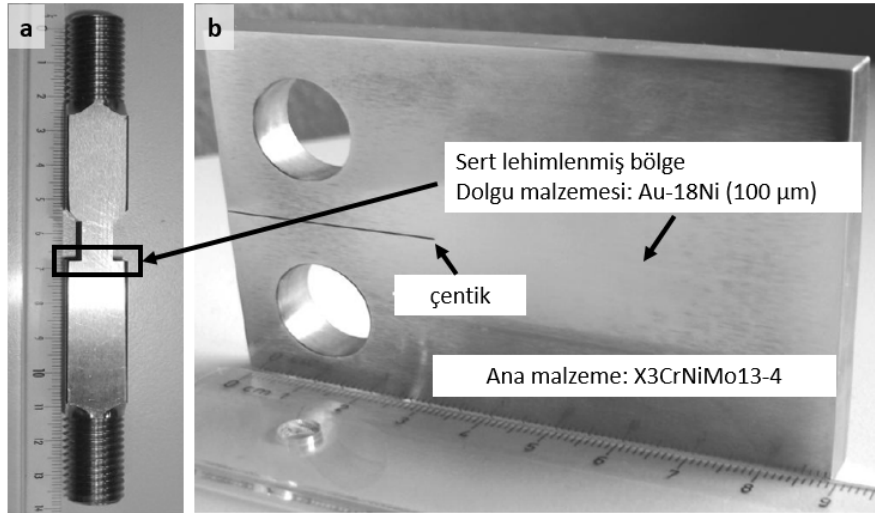
Paslanmaz çeliklerin fırında sert lehimleme ile farklı koruyucu gaz ortamlarında birleştirildiği ve bağlantı dayanımlarının yorulma testleri ile belirlendiği çalışmalara az rastlanması bu çalışmanın başlatılma gerekçesi olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada gelişmiş ülkelerde sıklıkla kullanılan ancak ülkemiz endüstrisinde istenilen yeri alamayan ve büyük bir öneme sahip fırında sert lehimleme yöntemi ile paslanmaz çelik malzemelerin birleştirilebilirliği araştırılmıştır. Çalışmada, fırında sert lehimleme prosesinde kullanılan farklı koruyucu gazların birleştirilmiş bölgenin yorulma dayanımı özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışma için endüstride kullanılan ve ağır yük altında çalışan, karmaşık geometrisi nedeni ile konvansiyonel kaynak yöntemlerinin uygulanamadığı X3CrNiMo13-4 martenzitik çelikten üretilmiş kompresör çarkı seçilmiştir. İki farklı koruyucu gaz koruması altında sert lehimleme prosesi ile birleştirilen numunelerin yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Yorulma testleri sonucu elde edilen veriler mikroyapı ve kırılma yüzeyleri üzerinden yapılan karakterizasyon çalışmaları ile değerlendirilmiştir.

II. DENEYSEL METOT

Bu çalışmada fırında sert lehimleme prosesi için kompresör çarkı üretiminde kullanılan X3CrNiMo13-4 martenzitik paslanmaz çelik ana malzeme olarak kullanılmıştır. Sert lehimleme dolgu malzemesi olarak ise 100 µm kalınlığında Au-18 Ni folyo seçilmiştir. Bu seçim X3CrNiMo13-4 ana malzeme ile Au-18 Ni folyonun metalurjik olarak uygunluğu değerlendirilerek yapılmıştır. X3CrNiMo13-4 martenzitik çelik plakalar 300x100x25 mm boyutlarında kesilerek sert lehimleme prosesi için hazırlanmıştır. SOLO Profitherm 600 marka endüstriyel gaz fırınında 1020 °C'de 20 dakika beklenerek sert lehimleme işlemi tamamlanmıştır. Sert lehimleme prosesinde %93 Ar - %7 H₂ ve %100 H₂ olacak şekilde iki farklı koruyucu gaz kullanılmıştır. Sert lehimlemeden sonra, numuneler azot atmosferinde 520 °C'de 5,5 saat süreyle temperlenmiştir.

Farklı koruyucu gazların etkilerini incelemek için T geometrili numuneler (Şekil 1a) üzerinde yorulma testleri ve DCB geometrili (Şekil 1b) numuneler üzerinde yorulma çatlak ilerleme testleri Rumul Type 8601 model standart elektro-mekanik servohidrolik test makinasında yapılmıştır. Minimum ve maksimum gerilmelerin oranı olarak tanımlanan R-değeri çalışmada 0,1 olarak seçilmiştir. Yorulma testleri için her bir T birleştirmesinden 6 adet, DCB geometrili parçalardan ise 4 adet sert lehimleme numunesi gerçekleştirilmiştir. Çatlak uzunluğunu doğru bir şekilde ölçmek için numunelerin her iki yüzeyi de dikkatlice parlatılmıştır. Çatlak uzunluğu, DCB numunesinin her iki tarafında iki gezici ışık mikroskobu kullanılarak periyodik olarak ölçülmüştür. Numunelerin iki yan yüzeyinde ölçülen çatlak uzunluğundaki farkın ihmal edilebilir düzeyde olduğu unutulmamalıdır.

Fraktografik (kırılmanın modunu belirlemek için yüzeyin mikroskobik incelemesi) makro incelemeler Leica M420 stereo mikroskop kullanılarak yapılmıştır. Sert lehimleme bölgesi için yapılan mikro yapı karakterizasyonu ise Philips-FEG XL30 taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sert lehimleme ile birleştirilmiş numunelerin birleşme bölgeleri sertlik testleri ile karakterize edilmeye çalışılmıştır. Ölçümlerde HV sertlik ölçme metodu ve 500 g yük kullanılmıştır.



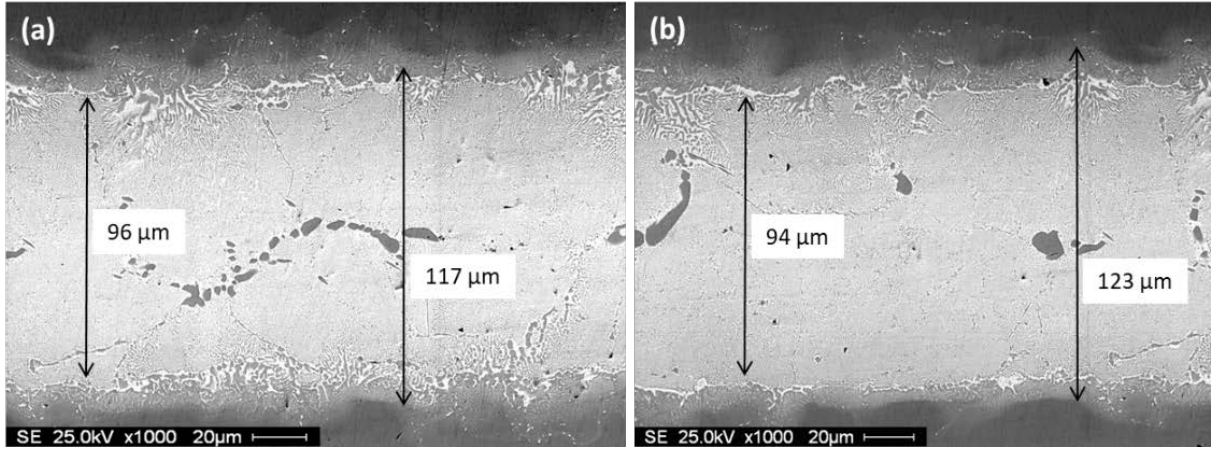
Şekil 1. Farklı koruyucu gazların etkilerini incelemek için gerçekleştirilen yorulma testlerinde kullanılan T geometrili (a) ve DCB geometrili (b) numuneler

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 2'de sert lehimleme sonrası %93 Ar - %7 H₂ (Şekil 2a) ve %100 H₂ (Şekil 2b) koruyucu gaz ortamlarında elde edilen bağlantı bölgeleri gösterilmiştir. Şekil 2a incelendiğinde, %93 Ar - %7 H₂ koruyucu gaz ortamlarında sert lehimleme öncesi iki malzeme arasına konulan 100 µm kalınlığındaki Au alaşımı folyonun yaklaşık %4 ana malzemelere difüzyon olmasıyla 96 µm kalınlığa düştüğü net bir biçimde görülmektedir. Şekil 2b ise %100 H₂ koruyucu gaz ortamında Au alaşımı folyonun yaklaşık %6 ana malzemelere difüzyon olmasıyla 94 µm kalınlığa düştüğü gösterilmiştir. Bunun nedeni, sert lehimleme esnasında fırına gönderilen koruyucu gazın etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Burada H gazının ana malzeme yüzeyindeki oksit filminin kolaylıkla yırtılmasına ve temizlenmesine katkı sağladığı, dolayısıyla Au alaşımli folyonun malzeme yüzeyine daha kolay difüzyon olduğunu göstermektedir. Leinenbach ve arkadaşları, sert lehimleme işlemi esnasında koruyucu gaz olan Ar gazına H ilavesi yaparak, ana malzemenin yüzeyindeki oksit filminin ilave edilen H gazı sayesinde kolaylıkla giderildiğini, bu durumun da Au alaşımı folyonun ıslatılması için oldukça önemli olduğunu rapor etmişlerdir [17]. Fırında sert lehimleme esnasında H₂ kullanımı, Au folyonun akışkanlık özelliğini artırmak için önemlidir. H₂ ana malzemenin yüzeyindeki oksitleri kolaylıkla parçalayarak, Au folyo alaşımının daha etkili bir biçimde yayılmasını, böylelikle de daha sağlam bir arayüzey bağlantısının elde edilmesine olanak sağladığı tespit edilmiştir. Şekil 2'de Au folyonun ana malzemeye difüzyonun artması bu sonucu doğrulamaktadır. Bu nedenle, arayüzey reaksiyonu %100 H₂ atmosferi altında daha iyi gerçekleşmiştir.

Ayrıca görüntüler üzerinde sert lehimleme esnasında sıcaklık ve sürenin etkisi ile Au arabağlayıcı folyodan ayrılarak ana malzemelere göç olan kısımda oluşan difüzyon bölgeleri de net olarak görülebilmektedir. Burada, folyo kalınlığındaki azalmanın difüzyon bölgesinin genişleme miktarına göre daha az olduğu gözlemlenmektedir. Bir başka ifade ile, %93 Ar - %7 H₂ ve %100 H₂ koruyucu gaz ortamlarında gerçekleştirilen sert lehimleme sonrasında, Au folyonun sırasıyla %4 ve %6 oranında azaldığı, buna karşın difüzyon bölgelerinin toplam genişliklerinin sırasıyla 117 µm ve 123 µm'ye ulaştığı tespit edilmiştir. Burada difüzyon bölgesinin azalan folyo kalınlığından daha fazla olmasının sebebi Au alaşımı folyonun ergime sıcaklığının daha düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Düşük ergime sıcaklığına sahip malzemeler sabit sıcaklıkta daha hızlı difüze

olmaktadırlar. Ayrıca difüzyonu etkileyen en önemli parametre, difüz eden elementlerin aktivasyon enerjileridir. Literatürde birleştirilen paslanmaz çelik ana malzemedeki alaşım elementlerinden östenit içerisinde çözünen Fe'nin aktivasyon enerjisi 269, Cr'nin 405, Ni'nin ise 280 kJ/mol olarak [18], ara tabaka olarak kullanılan altın'ın Ag ve Au içerisinde çözünürlüğü ise sırasıyla 190 ve 168 kJ/mol olarak verilmektedir [19]. Dolayısıyla bu iki etken ara bağlayıcı folyonun ana malzemeye difüzyonun daha fazla olmasının sebebi olarak gösterilir. Bir başka ifade ile aktivasyon enerjisi düşük olan elementin difüzyonunun kolay olduğu söylenebilir. Aydın ve ark. [20] titanyum ve bakır malzemeleri difüzyon kaynak yöntem ile birleştirmişler ve aktivasyon enerjisi düşük olan elementin difüzyon yoğunluğunun yüksek olduğunu rapor etmişlerdir.

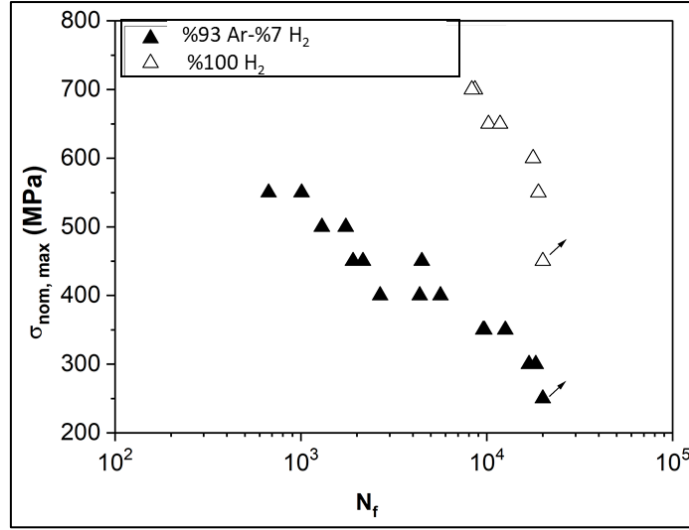


Şekil 2. Sert lehimleme sonrası %93 Ar - %7 H₂ (a) ve %100 H₂ (b) bağlantı bölgelerinin SEM görüntüleri

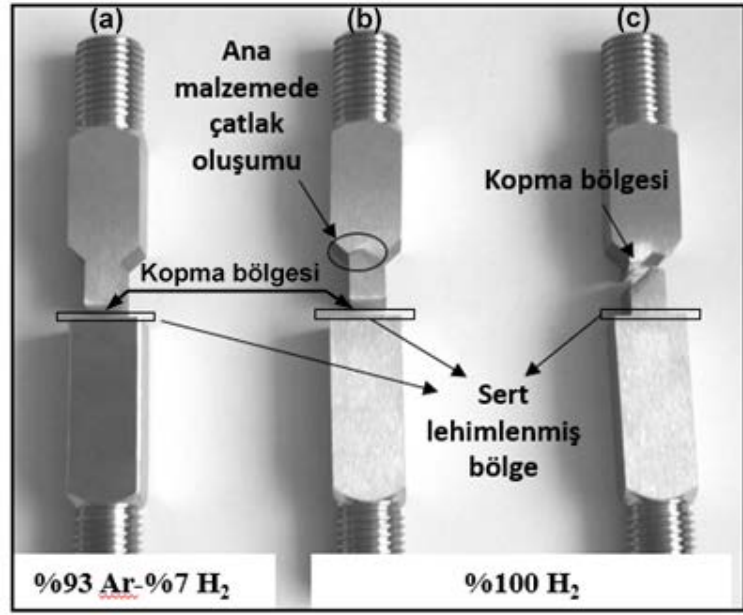
Sert lehimlemede kullanılan koruyucu gazın bağlantıların mekanik özelliklere etkisini anlayabilmek düşük çevrimli yorulma (LCF) testleri gerçekleştirilmiştir. Yorulma testi sonuçları Şekil 3'deki grafikte gösterilmiştir. Şekil 3 incelendiğinde her iki yorulma testi arasındaki tek fark, birleştirme işlemlerinde farklı koruyucu gaz kullanılmasıdır. %93 Ar - %7H₂ koruyucu gaz altında 20 000 çevrimde $\sigma_{nom,max}$ değeri 250 MPa iken, %100 H₂ koruyucu gazı kullanıldığında bu değer 450 MPa'a yükselmiştir. %100 H₂ atmosferinde sert lehimlenmiş numunelerin kalitesinin dikkate değer miktarda iyileştiği tespit edilmiştir. Sert lehimleme prosesinde koruyucu gaza H₂ eklenmesi, dolgu metalinin ıslatılması için büyük ölçüde önemlidir. Ar gazına H₂ gazı ilavesi veya sadece H₂ gazı kullanılması X3CrNiMo13-4 paslanmaz çelik yüzeyindeki oksit filmi tabakası parçalanarak giderilmesi sağlanır [1]. Bu nedenle %100 H₂ atmosferi kullanıldığında yüzeydeki oksit tamamen giderildiği için Au folyonun ana malzemeye difüzyonun artmış olup, yüksek kalitede sert lehimleme bağlantıları elde edilmiştir.

Şekil 4'te yorulma testi sonrası sert lehimleme ile birleştirilmiş numunelerin kopma bölgesi makro görüntüleri verilmiştir. Burada (a) %93 Ar - %7H₂ koruyucu gaz ortamında birleştirilmiş numuneyi, (b ve c) ise %100 H₂ koruyucu gaz ortamında birleştirilmiş numuneleri temsil etmektedir. Yapılan testler sonucunda %93 Ar - %7H₂ koruyucu gaz ortamında sert lehimleme prosesi ile birleştirilmiş numunelerin tamamında kırılma kaynak arayüzeyinden gerçekleşmiştir. %100 H₂ koruyucu gaz ortamında birleştirilen numunelerde ise kırılma genellikle kaynak bölgesinden (4 adet) gerçekleşmiştir. Bazı numunelerde (2 adet) ise kırılma arayüzeyde olmasına rağmen bu numunelerde ana malzeme ciddi deformasyona uğramış ve $\sigma_{nom,max}$ değeri ana malzemeye çok yakın

bulunmuştur. Bir başka ifade ile bu numunelerde kopma tamamen sert lehimleme bölgesinde gerçekleşse dahi, ana malzemede yorulma testi sonrası çatlak oluşumu gözlenmiştir.



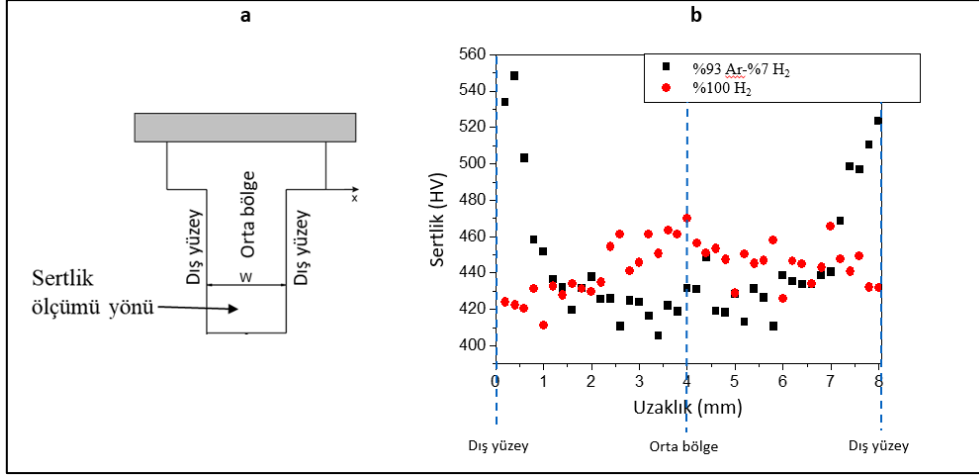
Şekil 3. %93 Ar - %7H₂ ve %100 H₂ koruyucu atmosferlerde yapılan sert lehimlenmiş numunelerin yorulma testi sonuçları



Şekil 4. Farklı koruyucu gaz atmosferinde sert lehimlenen numunelerin yorulma testi sonrası numune görselleri

İki farklı gaz koruması altında sert lehimleme ile birleştirilen numunelerde koruyucu gazın %100 H₂ atmosferi olması durumu hidrojen gevrekliği oluşumu durumunu düşündürmüştür. Bu nedenle farklı atmosferde sert lehimlenmiş numunelerin dış yüzeyden iç yüzeye doğru sertlik ölçümleri yapılmıştır. Şekil 5a'da sertlik ölçümünün numune üzerinden nasıl yapıldığı şematik bir gösterimle ifade edilmiştir. Numunelerin dış yüzeylerine herhangi bir zımparalama ya da parlatma işlemi yapılmamıştır. Şekil 5b'de farklı atmosferde sert lehimlenmiş

numunelerin sertlik değerleri dağılımı karşılaştırılmıştır. Sertlik değerleri karşılaştırıldığında farklı atmosferde lehimlenmiş numunelerinde merkezi ve civarındaki sertlik değerlerinin birbirlerine yakın (410-460 HV) olduğu ancak numunelerin dış bölgelerinde sertlik değerlerinin oldukça farklı olduğu (410-540 HV) gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda, farklı koruyucu gaz atmosferinde sert lehimlenen numunelerin dış yüzeylerindeki sertlik değişimini anlamak amacı ile mikroyapı çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

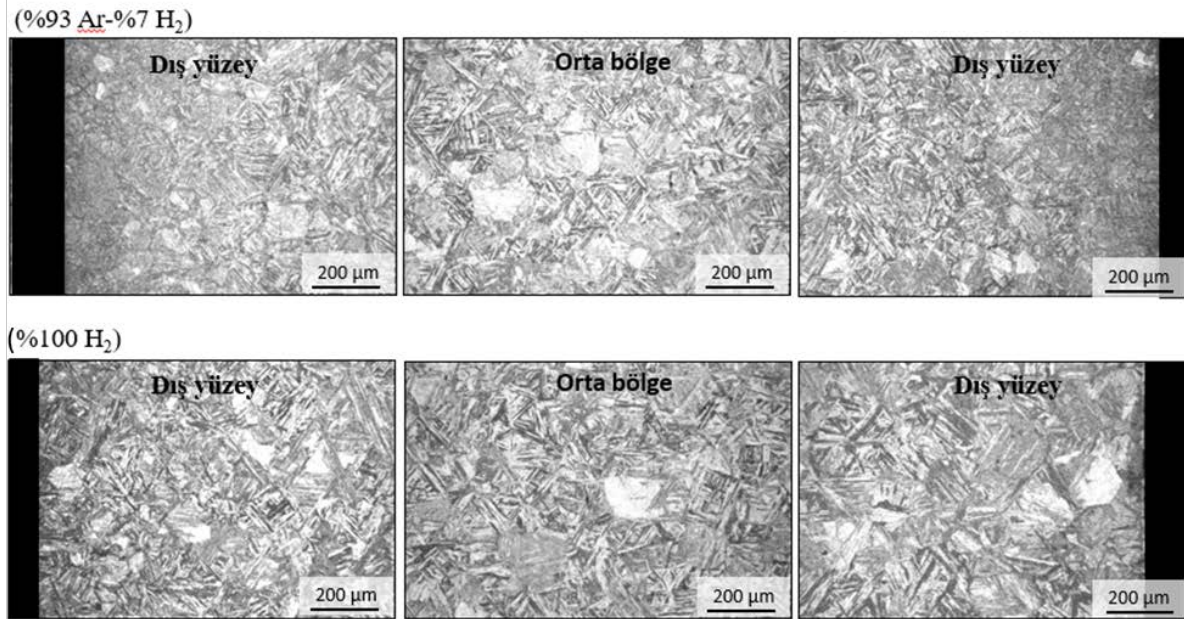


Şekil 5. Sert lehimlenmiş numunelerin sertlik ölçümü; (a) tanımlaması (b) sertlik grafiği

Sert lehimleme yöntemi ile iki farklı koruyucu gaz ortamında difüzyon sertlehimleme yöntemi ile birleştirilen numunelerin kaynak bölgesinde meydana gelen değişimler optik mikroskop ile görüntülenerek mikroyapıları değerlendirilmiştir. Şekil 6'da farklı atmosferde sert lehimlenmiş numunelerin mikroyapıları karşılaştırılmıştır. Şekil 6 incelendiğinde, %93 Ar - %7H₂ koruyucu gaz ile sert lehimlenmiş numunenin dış yüzeylerinde orta bölgesine göre daha ince mikroyapı gözlemlenmiştir. %100 H₂ atmosferi koruyucu gaz ile sert lehimlenmiş numunede ise dış yüzey ve orta bölgelerde oldukça benzer mikroyapılar gözlemlenmiştir. Dış yüzey mikroyapılardaki bu farklılığın, farklı atmosferlerin sağladığı farklı ısınma/soğuma hızlarıyla ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Dolayısıyla H₂ gazının Ar gazına göre yüksek ısı iletkenliğe sahip olması (argon 0.016 ve H₂ 0.18 (W/(m K)) bu durumun ortaya çıkmasına sebep olabilmektedir.

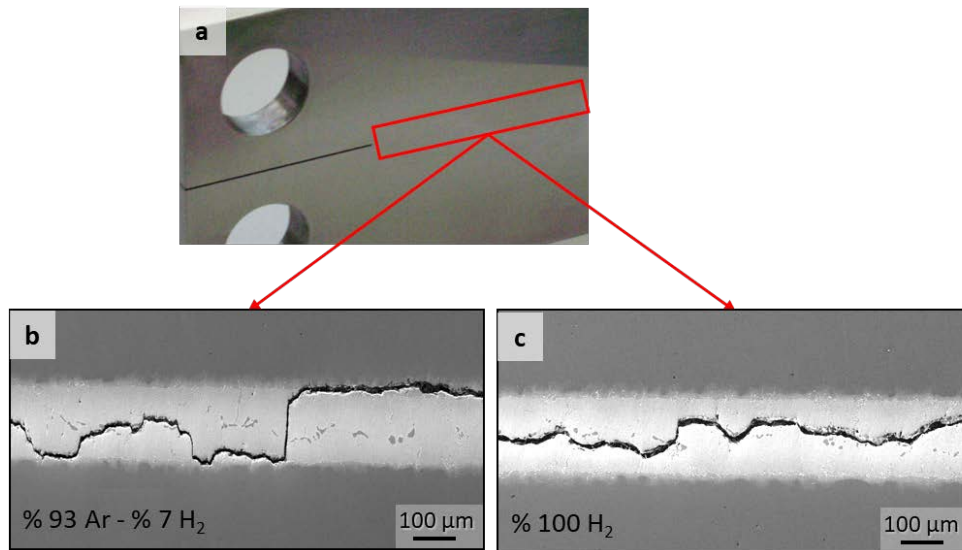
Sert lehimleme işlemi ile farklı koruyucu gaz ortamında birleştirilen numunelerin yorulma çatlakları ilerleme davranışını karakterize etmek için, DCB geometrili numuneler, yorulma testi durdurulup, makineden çıkarılarak yüzeyleri SEM ile incelenmiştir. Kırılma ilerlemesini gözlemlemek için farklı koruyucu gaz ile sert lehimlenmiş numunelerin yorulma çatlak ilerleme testleri sonrasında, numune yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri Şekil 7'de gösterilmiştir. %93 Ar - %7 H₂ koruyucu gaz altında sert lehimlenmiş numunede kırılma ilerlemesi difüzyon bölgesinde basamak şeklinde oluşmuş ve homojen olmayan bir davranış sergilemiştir (Şekil 7a). %100 H₂ koruyucu gaz altında sert lehimlenmiş numunede ise kırılma ilerlemesinin sert lehimlenmiş bölgedeki dolgu metalinin merkez hattı doğrultusunda ilerlediği görülmektedir (Şekil 7b). Difüzyonla ara bağlayıcı kullanılarak yapılan birleştirmelerde hem adezyon kuvveti (ana malzeme ile folyo arasında kalan ara yüzey) hem de kohezyon kuvveti (folyonun kendi içindeki dayanımı) meydana gelmektedir. Gerek adezyon gerekse kohezyon olayı yüzeyin serbest enerjisinin bir fonksiyonudur. Bu nedenle, bu tür ara bağlayıcı birleştirmelerde kohezyon türü kopma

tercih edilmektedir. %100 H₂ koruyucu gaz altında sert lehimlenmiş numunede kohezyon türü kopma gözlemlenmiş olması yorulma dayanımındaki artış ile uyum sağlamaktadır.



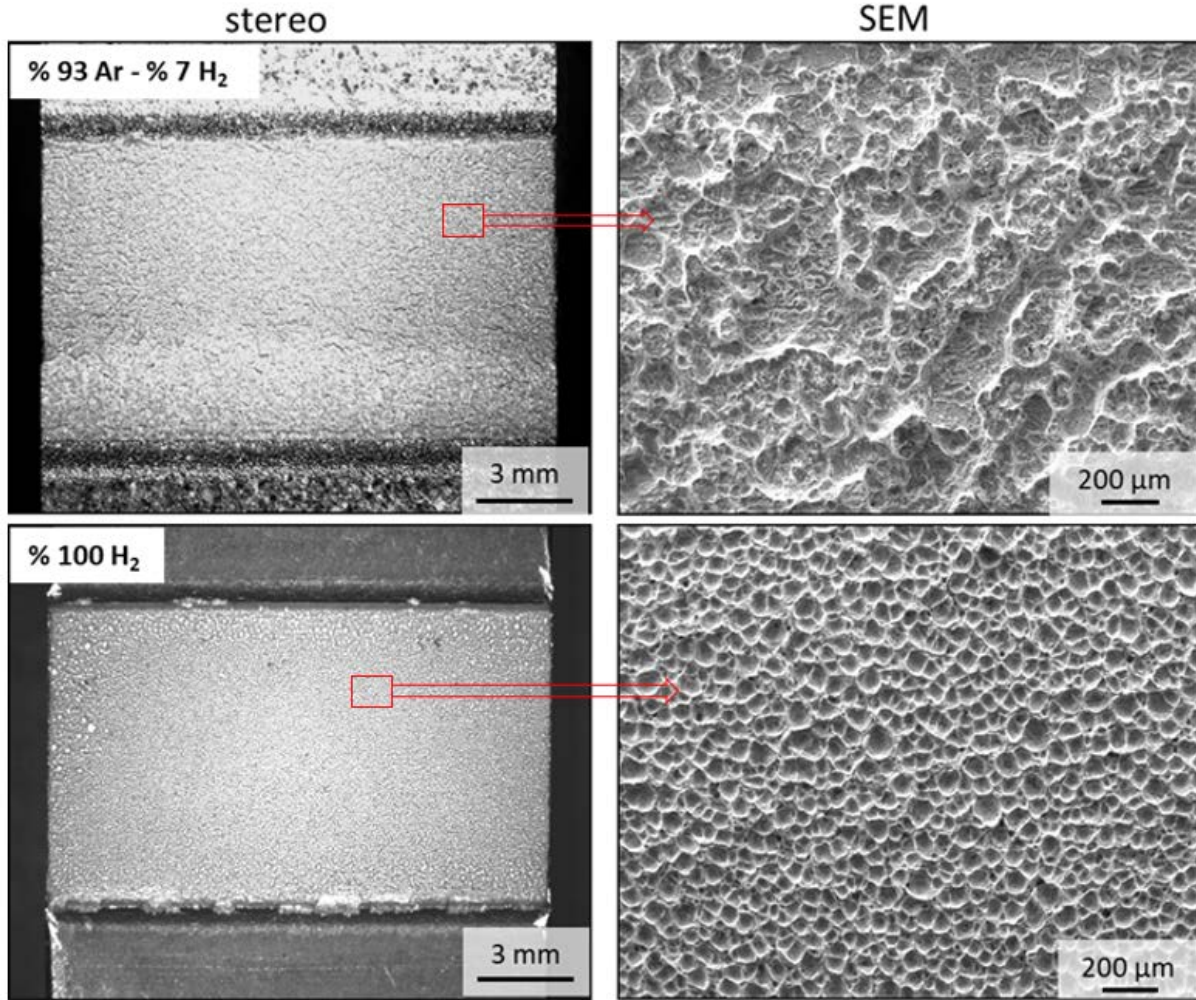
Şekil 6. Farklı atmosferde sert lehimlenmiş numunelerin mikroyapılarının karşılaştırılması

Yapılan kırılma yüzeyi incelemelerinde (Şekil 7), sert lehimlenmiş bölgede (Şekil 7a), %93 Ar - %7 H₂ koruyucu gaz altında sert lehimlenmiş numunede (Şekil 7b) basamaklı ve daha büyük genlikli bir alanda kırılma ilerlemesi gözlemlenmiştir. %100 H₂ koruyucu gaz altında sert lehimlenmiş numunede ise (Şekil 7c) daha dar genlikli ve sinüzoidal (dalga) şekilli (dolayısıyla kırılma yolu mesafesi fazla) kırılma ilerlemesi görülmüştür.



Şekil 7. Sert lehimlenmiş bölge (a) %93 Ar - %7 H₂ (b) ve %100 H₂ (c) atmosferleri altında sert lehimlenmiş numunelerin yorulma çatlak ilerleme testleri sonrasında, numune yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri

Şekil 8'de fırında sert lehimleme yöntemi ile iki farklı koruyucu gaz ortamında birleştirilmiş numunelerin kırık yüzeylerinden elde edilen stereo ve SEM görüntüleri verilmiştir. Burada %93 Ar - %7 H₂ ortamında birleştirilmiş numune yüzeyi yarı sünek lifli bir klivajlı kırılma davranışı sergilemiş iken %100 H₂ ortamında birleştirilmiş numune kırılma yüzeyinde gözlenen petekli kırılma yüzeyi özelliği, daha güçlü bir bağlantı eldesini ve daha iyi ara yüzey reaksiyonu oluştuğunun kanıtı olarak değerlendirilebilir. Doğan ve Gündüz [21] farklı ısıl işleme maruz bırakılmış çelik malzemelerin kırık yüzeylerinde yaptıkları SEM incelemeleri sonucunda klivaj tipi kırılmaların yarı gevrek, peteksi yapıların ise sünek karakterde olduklarını rapor etmişlerdir.



Şekil 8. Yorulma testi sonrası lehimlenmiş numunelerin kırılma yüzeylerinin karşılaştırılması

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada farklı koruyucu gaz atmosferinde fırında sert lehimlenen X3CrNiMo13-4 martenzitik paslanmaz çeliklerin malzemelerin yorulma özellikleri ile mikroyapı ve sertlik özellikleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir:

1. Farklı koruyucu gaz atmosferi kullanılarak sert lehimleme yöntemi ile elde edilen numunelerin, yorulma test sonuçları karşılaştırıldığında sert lehimleme kalitesi %100 H₂ atmosferi altında önemli ölçüde artmış

olup, %93 Ar - %7 H₂ koruyucu gaz altında 20.000 çevrimde $\sigma_{nom,max}$ değeri 250 MPa iken, bu değer %100 H₂ koruyucu gazı kullanıldığında yaklaşık %75 artışa 450 MPa'a yükselmiştir. 100 H₂ koruyucu gaz altında daha güçlü bağlanma elde edilmiş ve daha iyi arayüzey reaksiyonu oluşmuştur.

2. Sertlik değerleri karşılaştırıldığında farklı atmosferde lehimlenmiş numunelerinde sertlik değerlerinin birleşme arayüzeyi ve civarında benzer olduğu ancak numunelerin dış bölgelerinde sertlik değerlerinin oldukça farklı olduğu gözlemlenmiştir.
3. Farklı koruyucu gazlar altında fırında sert lehimlenen numunelerin merkez ve etrafında benzer, dış yüzeylerinde ise farklı mikroyapılar gözlenmiştir. Bu durumun, farklı atmosferlerde oluşan farklı soğuma hızlarıyla ilişkili olabileceği düşünülmüştür.
4. %93 Ar - %7 H₂ koruyucu gaz altında fırında sert lehimlenmiş numunede kırılma ilerlemesi geniş bir genlikte basamak şeklinde ilerlemiş olup homojen olmayan bir davranış göstermiştir. %100 H₂ koruyucu gaz altında sert lehimlenmiş numunede ise kırılma ilerlemesinin sert lehimlenmiş bölgedeki dolgu metalinin merkez hattı doğrultusunda ve dar bir genlikte ilerlediği görülmüştür.
5. Farklı koruyucu gaz ortamlarında fırında sert lehimleme yöntemi ile birleştirilen X3CrNiMo13-4 martenzitik paslanmaz çeliklerin SEM ile yapılan kırık yüzey incelemelerinde %93 Ar - %7 H₂ ortamında birleştirilmiş numune yüzeyi yarı sünek lifli bir klivajlı kırılma davranışı gözlemlenmiş iken, %100 H₂ ortamında birleştirilmiş numune kırılma yüzeyinde ise peteksü sünek bir yapı gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Başer T (2016) Microstructural and fractographic investigations of brazed martensitic stainless steel joints under cyclic loading. 18. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi IMMC'2016, 261.
2. Uzun H (2002) Sert lehimleme prensipleri. Değişim Yayınları, İstanbul, 18-21:236- 237.
3. Messler RW (1995) The challenges for joining to keep pace with advancing materials and design. *Materials and Design* 16(5):261–269, [https://doi.org/10.1016/0261-3069\(96\)00004-0](https://doi.org/10.1016/0261-3069(96)00004-0)
4. Boretius M (2006) The potential of vacuum brazing – state of the art and developments from the perspective of a service contractor. *Adv Eng Mater* 8(3):158–161. <https://doi.org/10.1002/adem.200500247>
5. Sanchez L, Sarrillo D, Rodriguez E, Aragon F, Sotelo J, Toral F (2011) Development of high precision joints in particle accelerator components performed by vacuum brazing. *Journal of Materials Processing Technology* 211(8):1379-1385. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.03.009>
6. Zhang J, Wang T, Liu C, He Y, (2014) Effect of brazing temperature on microstructure and mechanical properties of graphite/copper joints. *Materials Science And Engineering* 594(31):26-31. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.11.059>
7. Nowacki J, Swider P, (2003) Producibility of brazed high-dimension centrifugal compressor impellers. *J Mater Process Technol* 133(1-2):174–80. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00228-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00228-5)
8. Kassner ME, Kennedy TC, Schrems KK (1998) The mechanism of ductile fracture in constrained thin silver films. *Acta Mater* 46(18):6445-6457. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(98\)00299-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00299-7)
9. Kah P, Martikainen J (2013) Influence of shielding gases in the welding of metals. *Int J Adv Manuf Technol* 64:1411–1421. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4111-6>
10. Chern TS, Tseng KH, Tsai HL (2011) Study of the characteristics of duplex stainless steel activated tungsten inert gas welds. *Materials and Design* 32(1):255–263. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.05.056>
11. Tolle MC, Kassner ME, Cerri E, Rosen RS (1995) Mechanical behaviour and microstructure of Au–Ni braze. *Metallurgical and Materials Transactions* 26A:941–948. <https://doi.org/10.1007/BF02649090>
12. Wilhelm BF, Kai M, Ulrich H, Jörg S, Andre L, Christian R (2011) Boron and phosphorous free nickel-based filler metals for brazing stainless steel in shielding gas furnaces. *International Journal of Materials Research* 102(8):964-971. <https://doi.org/10.3139/146.110549>
13. Bach FW, Möhwald K, Holländer U (2010) Physico-chemical aspects of surface activation during fluxless brazing in shielding-gas furnaces. *Key Engineering Materials* 438:73-80. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.438.73>

14. Lugscheider E, Burger W, Broich U (1997) Development and characterization of joining techniques for dispersion-strengthened alümina. *Welding Research Supplement* 76(9):349-355.
15. Kahraman N (2003) Titanyum ve bakır çiftinin ara bağlayıcı difüzyon sert lehimlemesi ile fırında birleştirilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 16(3):611-618.
16. Gülenç B (2003) Difüzyon sert lehimlemesi ile titanyum ve düşük karbonlu çelik malzemelerin birleştirilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi* 5(1):22-28.
17. Leinenbach C, Schindler H., Başer TA, Rüttimann N (2010) Quasistatic fracture behaviour and defect assessment of brazed soft martensitic stainless steel joints. *Engineering Failure Analysis* 17:672-682. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.05.002>
18. Gündüz S (2019) *Metalurjide Faz Diyagramları*. 4. Güncellenmiş Baskı, Seçkin Akademik ve Mesleki Yayınları, Ankara, pp 177-179.
19. Donald RA (1996) *The science and engineering of materials*. Third S. I. Edition, Chapman Hall, London, pp 115-117.
20. Aydın K, Kaya Y, Kahraman N, (2012) Experimental study of diffusion welding/bonding of titanium to copper. *Materials and Design* 37:356-368. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.026>
21. Doğan T Gündüz S (2019) Effect of different grain sizes on the static strain aging behavior of bake hardening steel. *Materials Testing* 61(7):674-680. <https://doi.org/10.3139/120.111370>