
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

15-5PH SAC MALZEMELERDE FARKLI SICAKLIKLARIN ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞE ETKİSİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Ali Haydar ÖZCAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ali Haydar ÖZCAN

10/07/2023

15-5PH SAC MALZEMELERDE FARKLI SICAKLIKLARIN ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞE ETKİSİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Ali Haydar ÖZCAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2023

ÖZET

Bu çalışmada çökelme ile sertleştirilebilir 15-5 PH paslanmaz çelik sac malzemeye, farklı sıcaklıklarda uygulanan yaşlandırma ısıl işleminin, malzemenin mekanik özelliklerine, mikroyapısına ve V bükme ile şekillendirilebilirliğine etkileri araştırılmıştır. Gerçekleştirilen deneylerde Kondisyon A (Con A) 15-5 PH sac malzemesi 482 °C sıcaklıkta 60 dakika, 552 °C ve 621 °C sıcaklıklarda 240 dakika yaşlandırma ısıl işlemine tabi tutulmuş ve fırın içerisinde soğutma işlemi uygulanmıştır. Yapılan işlem sonrası H900, H1025 ve H1150 kondisyonları elde edilmiştir. Geleneksel çökelme sertleşmesi işleminde uygulanan hava ile soğutma yerine fırın içerisinde yapılan soğutma ile elde edilen numunelerin mekanik değerlerinin havada soğutma ile elde edilen mekanik değerlere göre %8 ila %10 oranında fazla olduğu gözlemlenmiştir. Uygulanan ısıl işlem sonrası malzemelerin mikroyapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiş ve çökelme sertleşmesi ile martenzitik oluşumun gerçekleştiği numunelerin hedeflenen kondisyonlara ulaştığı tespit edilmiştir. Isıl işlem uygulanan deney numuneleri V bükme ile şekillendirilebilirlik açısından incelenmiş ve 2, 4, 6 mm zımba uç radyusları (R) ve 15°, 30°, 45°, 60° ve 75° açılı kalıplarda 0-10 sn. ütüleme süresi uygulanarak şekillendirilebilirliği incelenmiştir. Bilgisayarlı koordinat ölçüm cihazı (CMM) yardımıyla numunelerin geri esneme değerleri ölçülmüştür. Con A'da 75° kırılarak bükülemeyen malzemelerin fırın içinde soğutma işlemi sonucunda tüm kondisyonlarda ve tüm açılarda sorunsuz şekillendirildiği belirlenmiştir. Artan yaşlandırma sıcaklığına bağlı olarak mekanik özelliklerdeki değişimler sebebiyle geri esneme açılarında azalma tespit edilmiştir. En yüksek geri esneme değeri, en yüksek mekanik özelliklere sahip H900 kondisyonda 75° bükme kalıbında 10,948° olarak elde edilmiştir.

Bilim Kodu	:	91438, Mühendislik, Makina Mühendisliği, Üretim Teknolojileri
Anahtar Kelimeler	:	15-5 PH, ısıl işlem, şekillendirilebilirlik, geri esneme, çökelme sertleşmesi
Sayfa Adedi	:	50
Danışman	:	Doç. Dr. İbrahim KARAAĞAÇ

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF VARIOUS TEMPERATURES ON FORMABILITY IN 15-5PH SHEET MATERIALS

Ali Haydar ÖZCAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2023

ABSTRACT

In this study, the effects of aging heat treatment applied at different temperatures to precipitation hardenable 15-5 PH stainless steel sheet material on the mechanical properties, microstructure and formability of the material by V bending were investigated. In the experiments carried out, Condition (Con A) 15-5 PH sheet material was subjected to aging heat treatment for 60 and 240 min. at temperatures of 482, 552 and 621°C, respectively, and cooling process was applied in the furnace. After the procedure, H900, H1025 and H1150 conditions were obtained. It was observed that the mechanical values of the samples obtained by cooling in the furnace instead of the air cooling applied in the traditional precipitation process were 8%-10% higher than the mechanical values obtained by air cooling. After the applied heat treatment, the microstructures of the materials were analysed by scanning electron microscopy (SEM) and it was seen that martensitic formation occurred with precipitation hardening and samples matching the mechanical values reached the targeted conditions. Samples were examined for formability by V bending and experiments were performed with (R) 2, 4, 6 mm punch tip radii and 15°, 30°, 45°, 60°, 75° angle dies with 2 repetitions by applying 0-10 sec. holding time. The spring back values of the samples were measured with the coordinate measuring machine (CMM). Although samples were broken at 75° for Con A, all conditions and at all angles were shaped smoothly in as a result of the cooling process of the materials in the furnace. A decrease in the spring back angles has been seen due to changes in mechanical properties caused increasing aging temperature. The highest spring back value was seen as 10.948° in a 75° bending die in H900 condition with the highest mechanical properties.

Science Code	:	91438, Engineering, Mechanical Engineering, Manufacturing Tech.
Key Words	:	15-5 PH, heat treatment, formability, spring back, preciptation hardening
Page Number	:	50
Supervisor	:	Assoc. Prof. Dr. İbrahim KARAAĞAÇ

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın ilk gününden itibaren bilgileri ve tavsiyeleri ile bana yol gösteren, kıymetli mesaisini bana ayırıp sorularımı içtenlikle yanıtlayan ve süreç boyunca desteğini esirgemeyen, değerli danışmanım Doç. Dr. İbrahim KARAAĞAÇ başta olmak üzere, çalışma arkadaşlarım Mehmet Yasin DEMİREL ve Ufuk AKYILDIZ 'a teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunuyorum.

Beni bu günlere getiren ve hayattaki en büyük destekçilerim olan, bana her koşulda kıymetli olduğumu hissettiren anneme, babama ve tüm süreçlerde yanımda olan sevgili eşime sonsuz teşekkürler ediyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET v

ABSTRACT vi

TEŞEKKÜR vii

İÇİNDEKİLER viii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 3

2.1. 15-5 PH Malzemelerde Isıl İşlem Çalışmaları 3

2.2. Paslanmaz Çelik ve Diğer Malzemelere Uygulanan Isıl işlemler ve Şekillendirme Çalışmaları 8

3. TEORİK KAVRAMLAR VE KURAMSAL TEMELLER 13

3.1. Bükme İşlemi ve Geri Esneme Davranışı 13

3.2. Paslanmaz Çelikler 15

3.2.1. Östenit paslanmaz çelikler 16

3.2.2. Ferritik paslanmaz çelikler 16

3.2.3. Martenzitik paslanmaz çelikler 16

3.2.4. Çökeltme sertleşmeli paslanmaz çelikler 16

3.2.5. Dubleks paslanmaz çelikler 17

3.3. Paslanmaz Çeliklere Uygulanan Isıl İşlem Yöntemleri 17

3.3.1. Paslanmaz çeliklerde tavlama ısıl işlemi 18

3.3.2. Paslanmaz çeliklerde solüsyona alma ısıl işlemi 20

Sayfa

3.3.3. Paslanmaz çeliklerde temperleme ısıl işlemi 21

3.3.4. Paslanmaz çeliklerde çökelme sertleşmesi ısıl işlemi 21

4. MATERYAL METOD 23

4.1. Deney Malzemesinin Karakterizasyonu 23

4.2. Deneysel Çalışma Parametreleri 24

4.3. Deney Düzeneği ve Deneysel Çalışma Ortamı 28

4.4. Deney Numunelerinin Mikroyapı İncelemesi 29

4.5. Geri Esneme Ölçümü 30

5. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA 31

5.1. 0 sn. Ütüleme Süresinde Şekillendirilebilirlik Sonuçları 34

5.2. 10 sn. Ütüleme Süresinde Şekillendirilebilirlik Sonuçları 34

5.3. Alaşım Mikroyapısının İncelenmesi 35

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 41

KAYNAKLAR 43

ÖZGEÇMİŞ 50

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.1. Kimyasal analiz sonuçları 24

Çizelge 4.2. Deneysel çalışma parametreleri ve elde edilmesi hedeflenen sonuçlar..... 24

Çizelge 4.3. Yaşlandırma ısıl işlemi parametreleri 25

Çizelge 4.4. Yaşlandırma ısıl işlem parametrelerine göre alaşımın mekanik özellikleri 27

Çizelge 4.5. Deney düzeneğinin teknik özellikleri 29

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Çift aşamalı yaşlandırma ısıl işleminin sıcaklık zaman grafiği 4

Şekil 2.2. Mekanik özelliklerin yaşlandırma sıcaklığına bağlı değişimi 5

Şekil 2.3. Farklı yaşlandırma ısıl işlemleri altında malzemenin TEM görüntüleri..... 6

Şekil 2.4 Martenzetik matris ve kalıntı östenit yapılarının arasında bulunan M23C6 karbürü 7

Şekil 2.5. Eliptik ε–Cu çökeltilerini gösteren TEM görüntüsü..... 8

Şekil 3.1. V bükme işleminin şematik gösterimi 14

Şekil 3.2. Geri esnemenin şematik gösterimi..... 14

Şekil 3.3. Bükme işleminde geri esnemenin taslak gösterimi 15

Şekil 3.4. Östenit ve Martenzit yapıların şematik gösterimi..... 18

Şekil 3.5. Tavlama sıcaklığa bağlı olarak sınıflandırılmış tavlama çeşitleri 19

Şekil 4.1. Çekme testi için numune ölçüleri (ASTM-E8M) 24

Şekil 4.2. a) PID kontrollü deney fırını b) Deney numunelerinin fırın içinde yerleşimi 25

Şekil 4.3. 15-5 PH alaşımının çekeme testi numuneleri a) Con-A b) H900 c) H1025 d) H1150 26

Şekil 4.4. Yaşlandırma ısıl işlemi ile elde edilen farklı kondisyonlar için 15-5 PH alaşımının çekme testi sonuçları 26

Şekil 4.5. a) Deney düzeneğinin genel görünümü b) Deney düzeneği detay görünümü 28

Şekil 4.6. Deney düzeneği kontrol yazılımının ekran görüntüsü..... 29

Şekil 4.7. Geri esneme ölçümü çalışma ortamı a) CMM b) Numune ölçme işlemi 30

Şekil 5.1. 0 sn. ütüleme süresine göre geri esneme grafikleri..... 32

Şekil 5.2. 10 sn. ütüleme süresine göre geri esneme grafikleri..... 33

Şekil 5.3. 15-5 PH alaşımının mikroyapı görüntüleri a) Con A b) H900 c) H1025 d) H1150 36

Şekil 5.4. H900 kondisyonuna ait farklı noktalarından alınan XRD sonuçları 37

Sayfa

Şekil 5.5. H1025 kondisyonuna ait farklı noktalarından alınan XRD sonuçları 38

Şekil 5.6. H1150 kondisyonuna ait farklı noktalarından alınan XRD sonuçları 39

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada içerisinde kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, karşılık gelen açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
$\mathbf{A_1}$	Alt kritik sıcaklık
$\mathbf{A_2}$	Üst kritik sıcaklık
$\mathbf{^oC}$	Santigrat derece
$\mathbf{F_b}$	Bükme kuvveti (N)
t	Malzeme kalınlığı (mm)
V	Şekillendirme hızı (mm/sn)
Ɛ	Birim uzama
σ	Çekme mukavemeti (N/mm^2)
w	Bükme kanalı genişliği (mm)

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
APT	Atom probu tomografisi
CMM	Bilgisayarlı koordinat ölçüm cihazı
dk	Dakika
EBSD	Elektron geri saçılma kırınımı
$\mathbf{F_{zımba}}$	Zımba Kuvveti (Newton)
GPa	Gigapascal
HRC	Rockwell sertlik değeri
J	Joule
kJ	Kilo joule
Ks	Geri esneme faktörü
kW	Kilowatt
lt	Litre
mm	Milimetre
MPa	Megapascal

Kısaltmalar	Açıklamalar
OM	Optik mikroskop
Pa	Pascal
PH	Çökelmeyle sertleştirilmiş paslanmaz çelikler
R	Zımba uç radyusu
RT	Oda sıcaklığı
sa	Saat
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
sn	Saniye
SXRD	Senkrotron X-ışını kırınımı
TEM	İletim elektron mikroskobu
UTS	Maksimum çekme dayanımı
YSA	Yapay sinir ağı
XRD	X-ışını kırınımı

1. GİRİŞ

Paslanmaz çelikler, sahip olduğu yüksek mekanik özellikleri ve üstün korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı; havacılık, otomotiv ve petro-kimya endüstrileri ile nükleer santral bileşenleri gibi pek çok sanayi dalında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Martenzitik paslanmaz çelikler grubunda bulunan 15Cr-5Ni PH (15-5 PH) alaşımı, martenzit matris içerisinde çözünmüş bakır (Cu) parçacıklarının çökelmesi sonucu sertleştirilerek oldukça yüksek mukavemet değerine sahip olmaktadır. Çökelme sertleştirilmesi işlemi ile elde edilen 15-5 PH çeliği yüksek dayanım, korozyona karşı sahip olduğu direnç ve yüksek servis sıcaklıklarında özelliklerini muhafaza edebilme kabiliyeti dolayısıyla savunma ve havacılık sanayilerinde motor ve yapısal bağlantı elamanları gibi parçalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. 15-5 PH alaşımı çelik malzeme kullanılarak yapılan üretimlerde, talaşlı imalat ve kaynaklı birleştirme gibi başlıca imalat yöntemlerinin yanı sıra sac metal ürünlerin üretiminde şekillendirme prosesi de sıklıkla kullanılmaktadır. Sac metal ürünlerin büyük bir çoğunluğu kalıp ile şekillendirilmekte olup bunun yanı sıra bükme işlemi de en yaygın şekillendirme yöntemlerinden birisidir. Sac metal malzemelerin V bükme yöntemiyle şekillendirmesi de çok yaygın bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Ancak bükme ile şekillendirilen sac metal imalatı parçalarda karşılaşılan en önemli sorunlardan birisi de şekillendirilen parçalarda oluşabilen ve ayrıca ölçü ve kalite sorunlarına sebep olan geri esneme davranışıdır. Yüksek mukavemetli sac malzemelerin oda sıcaklıklarında şekillendirilebilme kabiliyetleri oldukça düşük olduğundan, şekillendirme işlemleri esnasında yırtılma, çatlama ve kırılma gibi imalat açısından sorun oluşturacak durumlar meydana gelmektedir. Şekillendirme kusurları çeliklere uygulanan bazı ısıl işlemler neticesinde ortadan kaldırıldığında ise, şekillendirilen sac malzemelerde, sac metal endüstrisinin en önemli problemlerinden birisi olan geri esneme davranışı meydana gelmektedir [1-3].

Bu çalışmanın asıl hedefi; başta havacılık ve otomotiv endüstrileri olmak üzere çok sayıda sektörde kullanılan ve sınırlı bir şekillendirilebilirliğe sahip olan 15-5 PH paslanmaz çelik malzemenin yaşlandırma ısıl işlem parametrelerine göre şekillendirilebilirliğinin deneysel olarak araştırılmasıdır. 15-5 PH sac malzemeler yüksek açılarda bükerek şekillendirildiğinde çatlamakta veya kırılmaktadır. Yaşlandırma ısıl işlem süreçleri ile bu malzemenin kondisyonları değiştirmekte ve mekanik özelliklerini de değişime uğratmaktadır. Bu sebeple

15-5 PH sac malzemelere uygulanan yaşlandırma ısıl işleminin şekillendirilebilirliğe nasıl etki edeceğinin belirlenmesine ihtiyaç vardır. Ancak klasik yaşlandırma süreçleri mekanik özelliklerde azalmaya sebep olmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada ayrıca soğutma ortamının etkileri de incelenmiştir.

Tez çalışması kapsamında, 1,6 mm kalınlığında 15-5 PH paslanmaz çelik sac malzeme kullanılmıştır. Deney numunelerinin hazırlanması aşamasında ısı ile temasında özelliklerin değişmemesi için 20 mm x 40 mmm boyutlarında su jeti ile kesilerek hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında deney numunelerine farklı sıcaklıklarda (482, 552 ve 621 °C) ve değişen ısıl işlem sürelerinde (60 dk. ve 240 dk.) çökelme sertleşmesi ısıl işlemi uygulanmıştır. Zımba radyusu (R) 2, 4, 6 mm, şekillendirme hızı (V) 10 mm/sn ve sabit bükme kuvveti ($F_{zımba}$) uygulanarak 15°, 30°, 45°, 60°, ve 75° açılı kalıplarda 0 ve 10 saniye ütüleme süreleri ile V bükme işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil verilmiş sac malzemelerin CMM ile geri esneme değerleri ölçülmüş ve ısıl işlem parametrelerine göre mikroyapı değişimleri ve şekillendirilebilirlikleri değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

PH paslanmaz çelikler, üstün mekanik özellikleri ve yüksek sertlik değeri nedeniyle oda sıcaklığın koşullarında soğuk şekillendirilebilirliği oldukça sınırlı ve zordur. Bu nedenle, şekillendirme sonucu oluşan yüksek geri esneme değerlerini azaltmak, nihai şekle yakın parçalar üretmek için şekillendirme öncesi ısıl işlem gerekebilmektedir. Literatürde, ısıl işlemin, 15-5 PH paslanmaz çeliğin mekanik özelliklerine ve şekillendirilebilirliğine etkisi hakkında yapılan çalışmalar sınırlıdır. Literatür çalışması öncelikle 15-5 PH çelikler için ısıl işlem çalışmaları ve paslanmaz çelikler ile diğer çeliklerin ısıl işlemi ve şekillendirilebilirlik çalışmaları olmak üzere iki bölüme ayrılmıştır.

2.1. 15-5 PH Malzemelerde Isıl İşlem Çalışmaları

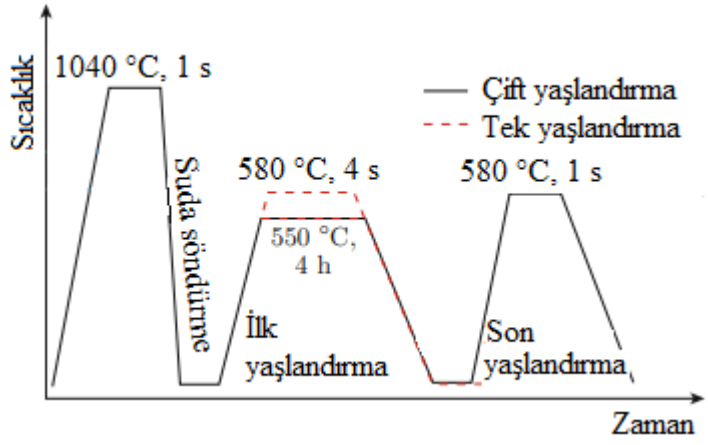
Çökelmeyle sertleştirilebilen paslanmaz çeliklerin şekillendirilebilirlikleri ve geri esneme davranışları üzerine literatürde yapılan çalışmalar sınırlıdır. Bu nedenle çalışmalar çoğunlukla ısıl işlemin mekanik özelliklere etkileri üzerinde yoğunlaştırılmıştır.

Herny çalışmasında, yeni nesil turbo jet motoru pylon parçasında kullanılan 15-5PH alaşımının maksimum kullanım sıcaklığını belirlemek için farklı sıcaklıklarda alaşımın mekanik özelliklerini incelemiştir. 1050 °C'de 30 dakika boyunca solüsyona alınıp ani soğutma sonrası sertleştirilmiş ve 550 °C'de 4 sa boyunca ısıl işleme tabi tutulmuş 6mmx10 mm yanal kesite sahip 55 mm boyundaki test numunelerini yorulma testine tabi tutarak malzemeyi karakterize etmişlerdir. Daha sonra 350, 400, 450 ve 500°C sıcaklıklarda 15 ile 5000 sa arasında sürelerde malzemeyi yaşlandırma ısıl işlemine tabi tutmuşlardır. Uzun süreli yaşlandırmaların sadece 400°C altında efektif olduğunu, diğer sıcaklıklarda krom ve demir oranında zenginleşme ve buna bağlı olarak malzemede gevreklik belirtmişlerdir. 350 ve 400 °C'de yaşlandırmanın, malzemenin darbe dayanımında %27 ‘lik bir düşüşe neden olduğu ancak hem akma dayanımında hem de sertliğinde arttığı gözlemlenmiştir [4].

Zhou vd. yaptıkları çalışmada, 15-5 PH alaşımına yaşlandırma ısıl işlemi uygulayarak mikroyapısındaki değişimleri atom probu tomografisi (APT) analizi, bilgisayar destekli termodinamik, kinetik ve senkrotron X-ışını kırınımı (SXRD) yöntemleri ile incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar, koruyucu argon atmosferine sahip boru tipi bir fırında

gerçekleştirmiştir. 1 sa boyunca 1170 °C'de solüsyona alındıktan sonra soğutulan deney numunelerine, 20 sa boyunca 500 °C'de yaşlanma işlemi uygulanmıştır. Deney sonuçları, bakır bakımından zengin çökelmenin malzemenin nominal bileşimi ile neredeyse aynı bileşime sahip olduğunu ve çökelme işleminden sonra kalıntı östenit oluştuğunu göstermiştir. Ayrıca bu durum, SXRD ve APT analizleriyle de doğrulanmıştır [5].

Rigele vd. alaşımın mukavemet ve tokluğunun daha iyi bir bileşimini elde etmek için, Cu çökeltilerini düzenleyecek ve belirli bir miktarda ters östenit dönüşümü oluşturacak şekilde yaşlandırma işlemi tasarlanmışlardır. Bu sayede daha iyi akma, çekme mukavemetine ve düşük sıcaklık tokluğuna sahip kondisyon oluşturmayı hedeflemişlerdir. Çalışma sonucunda, 550 °C sıcaklıkta 4 sa ve ardından 580 °C'de 1 sa çift yaşlandırma işlemi kullanılarak daha iyi bir mukavemet ve düşük sıcaklık tokluğu elde etmişlerdir. Çift aşamalı yaşlandırma ısıl işleminin sıcaklık zaman grafiği Şekil 2.1'de verilmiştir. Akma mukavemeti, nihai gerilme mukavemeti ve Charpy darbe enerjisi sırasıyla 1,037 GPa, 1,086 GPa ve 179 J olarak belirtilmiştir [6].

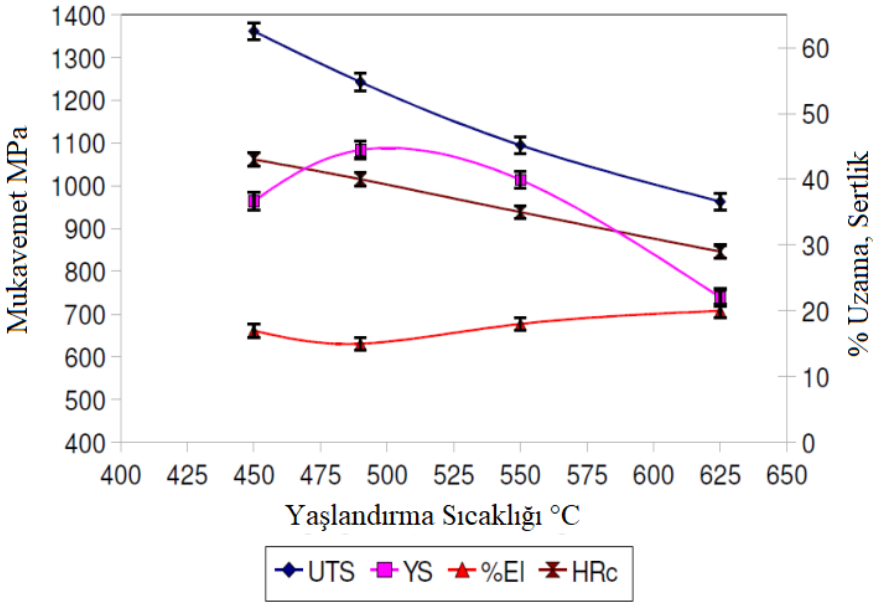


Şekil 2.1. Çift aşamalı yaşlandırma ısıl işleminin sıcaklık zaman grafiği

Aldhabib vd. de deneysel çalışmalarında, alaşımın mekanik özelliklerini optimize etmek için ultra yüksek yaşlandırma sıcaklıkları da dahil çeşitli ısıl işlemleri araştırmışlardır. Numuneler üzerinde yaşlandırma sıcaklıklarının, zamanının, ısıtma oranlarının ve çoklu yaşlandırma işlemlerinin etkilerini gözlemlemek amacıyla toplam 38 farklı ısıl işlem gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonuçları, sertlik ile nihai ve akma dayanımı arasında doğrusal bir ilişki olduğu ve test edilen tüm numunelerde çok ince taneli martenzitik yapılar gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntülerinde, tüm

numunelerde sünek kırılma tespit edilmiştir [7].

Kumar vd. farklı yaşlandırma ısıl işlemlerinin, alaşımın mikroyapısına ve mekanik özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Deneysel çalışma sonucunda, optimum mukavemet, sertlik ve süneklik gerektiren uygulamalar için H925 yaşlandırma döngüsü önerilmiştir. Bükme ve soğuk işleme operasyonlarında mükemmel boyutsal doğruluklar elde etmek için H1150'lik bir yaşlandırma döngüsünün ideal olduğu belirtilmiştir. Mekanik özelliklerin yaşlandırma sıcaklığına bağlı değişimi Şekil 2.2'de verilmiştir [8].

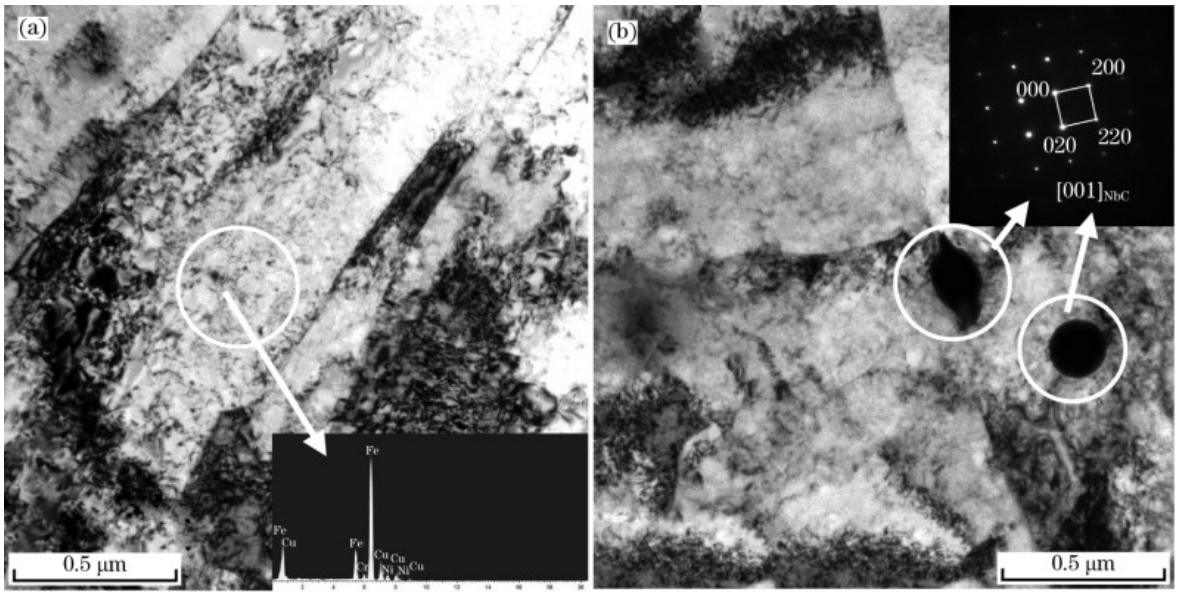


Şekil 2.2. Mekanik özelliklerin yaşlandırma sıcaklığına bağlı değişimi

Palasinamy vd. çalışmalarında, Con A, H1150-M ve H900 gibi farklı yaşlandırma rejimlerinde kondisyon almış 15-5 PH paslanmaz çeliğinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin, işlenebilirlik üzerindeki etkilerini araştırmayı amaçlamışlardır. Çalışma sonuçlarına göre H900 koşulu altında yaşlandırılmış numunelerin tornalama işlemi sırasında teğetsel kesme kuvveti 125,73 N iken H1150-M koşulunda ölçülen kesme kuvveti ise 52,96 N olarak ölçülmüştür. İlerleme hızı arttıkça, tüm işleme koşulları için yüzey pürüzlülüğünün değerinin arttığı ve H900 numunesinin hava soğutmalı koşullarda işlenmesi sırasında diğer kondisyonlara göre daha iyi yüzey kalitesi ile işlenebildiği gözlemlemişlerdir [9].

Peng vd. yaptıkları çalışmada %3 bakır içeren 15-5 PH alaşımının 400 ila 620 °C yaşlanma sıcaklığında 0 ila 8 sa aralığında ısıtıp ani şekilde soğutarak, sıcaklığın ve zamanın alaşımın mikroyapısına ve mekanik özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Farklı yaşlanma

sıcaklıklarında işleme alınan 15-5 PH paslanmaz çeliğinin ortam sıcaklığındaki mekanik özelliklerini çekme testleri ile, mikroyapısal özelliklerini ise optik mikroskop (OM), iletim elektron mikroskobu (TEM), elektron geri saçılma kırınımı (EBSD) ve X-ışını kırınımı (XRD) kullanarak analiz etmişlerdir. Farklı yaşlanma sıcaklıkları ile ilgili mikroyapıların genel olarak iğne martenzit olduğu, dislokasyon yoğunluğu ve bakır çökelmesi ile dayanımı arttırılmış alaşımın farklı yaşlanma sıcaklıkları altında ters östenit dönüşümü ve martenzit yapılarının yanı sıra NbC çökeltilerinden de oluştuğunu belirtilmiştir. Şekil 2.3 a'da 450 °C sıcaklıkta 4 sa yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış numunelerin TEM görüntülerinde parlak alanlar iğne martenzitik yapıyı ve küçük Cu çökeltilerini göstermektedir. Şekil 2.3 b'de ise 480 °C sıcaklıkta 4 sa yaşlandırılmış numunelerde oluşan NbC çökeltileri ve martenzitik yapı görülmektedir [10].

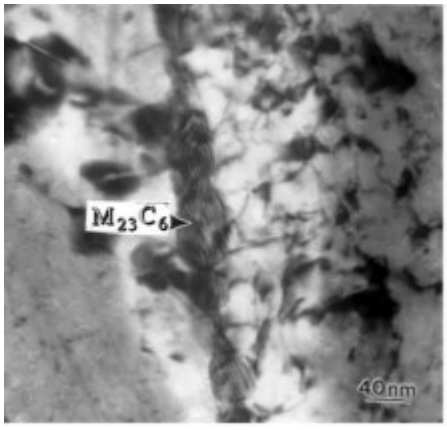


Şekil 2.3. Farklı yaşlandırma ısıl işlemleri altında malzemenin TEM görüntüleri

Khafri ve Adhami yaptıkları çalışmada, 15-5 PH paslanmaz çeliğin sıcak deformasyon davranışını, 900-1150 °C sıcaklık aralığında ve 0,001 ile 0,5 s^{-1} arasında değişen gerinim oranlarında sıcak sıkıştırma testleri ile incelemişlerdir. 5 mm çapında ve 7,5 mm kalınlığında hazırlanan ısıl işlem görmüş silindirik deney numuneleri bilgisayar kontrollü servo hidrolik test makinesinde sıkıştırma testine tabii tutmuşlardır. Sıcak deforme olmuş malzemenin mikroyapısını sabit tutmak için sıkıştırma testinden hemen sonra numuneleri suda söndürmüşlerdir. Çalışma sonucunda, bakır çökelti fazlarının malzemenin sıcak şekillendirme davranışını etkilediği gözlemlenmiştir. Alaşımın sıcak deformasyonu için ortalama görünür aktivasyon enerjisinin 492 ± 21 kJ / mol olduğu ve çalışılan sıcaklık

aralığında gerinim hızı hassasiyet parametresi olan m değerinin sıcaklık ile arttığı ve yüksek sıcaklıkta meydana gelen dinamik yeniden kristalleşmenin, ana yumuşama mekanizması olduğu belirtilmiştir [11].

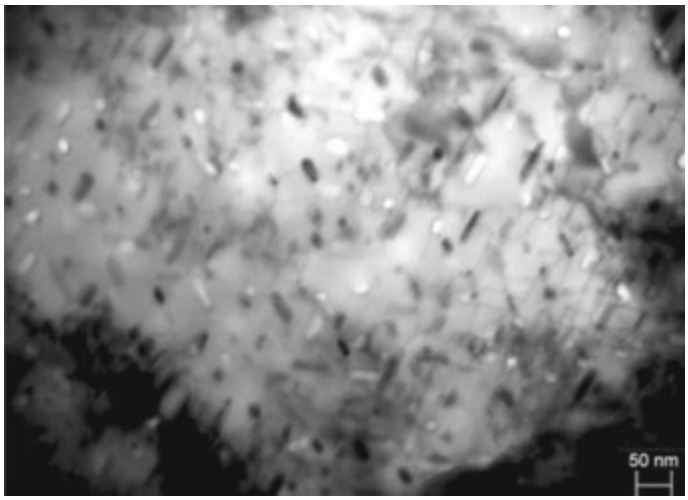
Habibi yaptığı çalışmada, farklı sıcaklık ve zaman parametrelerinde uygulanan ısıl işlemler sırasında 15-5 PH paslanmaz çeliğin mikroyapısını ve mekanik özelliklerini analiz etmiştir. Deney numunelerinin atmosferden etkilenmesini engellemek amacıyla atmosfer kontrollü bir fırın yardımıyla 450 ve 750 °C arasında 2 ila 256 sa arasında izotermik olarak solüsyona alma ısıl işlemi uygulanmıştır. Numuneler ardından suda söndürülmüştür. Numunelerin ilk hali için akma mukavemeti 808 MPa ve nihai gerilme mukavemeti 1044 MPa iken, solüsyona alma sonrası numunenin akma ve nihai gerilme mukavemetleri sırasıyla 874,5 MPa ve 982,5 MPa olarak ölçülmüştür. 500 °C'de 2 saatlik yaşlandırmadan sonra ölçülen akma ve nihai gerilme mukavemetlerinin değerleri sırasıyla, 1150 MPa ve 1240 MPa olarak belirtilmiştir. Ayrıca, numunelerin ilk halinde bulunan NbC ve M7C3 karbürlerine ek olarak 500 °C üzeri sıcaklıklarda 128 sa yapılan yaşlandırma işleminde Şekil 2.4'te görülebileceği üzere çoğunluğu martenzetik matris ve kalıntı östenit yapılarının arasında bulunan M23C6 karbürü gözlemlenmiştir [12].



Şekil 2.4. Martenzetik matris ve kalıntı östenit yapılarının arasında bulunan M23C6 karbürü

Kumar vd. çalışmalarında, 15-5 PH alaşımının mekanik özelliklerin en iyi kombinasyonunu elde etmek için kimyasal bileşim, işleme (dövme ve haddeleme) ve ısıl işlem parametrelerinin optimizasyonunu incelemişlerdir. Bunun için işlem görememiş ham malzemeyi elektrik ark ocağı ve daha sonrasında vakumlu ark ocağı ile yeniden eriterek kondisyon sağlamışlar ve dövme ile şekillendirmeyle istenilen özelliklerdeki malzemeyi elde etmişlerdir. Elde edilen malzemenin karakterizasyonu için, üç farklı eriyik üzerinde

metalürjik değerlendirmeler ile elde edilen sonuçlar kullanılmıştır. Malzemenin istenilen kondisyonlara getirebilmesi için uygulanan yaşlandırma ısıl işlemi sırasında oluşan ε-Cu çökeltilerinin küresel şekilli ve tanecik matrislerin tutarlılığının alaşımın dayanıma katkı sağladığını belirtilmiştir. Şekil 2.5'te eliptik ε-Cu çökeltileri verilmiştir. Oryantasyon ilişkisinin FCC-BCC sistemlerinde yaygın olan Kurdjumov-Sachs (K-S) oryantasyonu olduğu gözlemlenmiştir [13].



Şekil 2.5. Eliptik ε–Cu çökeltilerini gösteren TEM görüntüsü

2.2. Paslanmaz Çelik ve Diğer Malzemelere Uygulanan Isıl işlemler ve Şekillendirme Çalışmaları

Bu bölümde paslanmaz çelik malzemelere uygulanan ısıl işlem çalışmalarının şekillendirilebilirliğe etkileri ve bükme ile şekillendirme sonucu gözlemlenen geri esneme davranışına etki eden parametrelerin farklı malzeme türlerine göre değişimleri derlenmiştir.

Leu, V bükmede geri esneme değerinin tahmini için; mukavemet oranı, normal anizotropi, gerinim-sertleşme üssü ve geometrik oranı içeren temel eğilme teorisine dayalı basitleştirilmiş bir model önermişlerdir. Geri esnemeyi azaltmak için zımba yarıçapı, malzeme mukavemeti ve sac kalınlığı gibi proses parametrelerinin geri esneme oranı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Deneysel çalışmalarda 1,4 mm ve 1,8 mm kalınlığında SPFC 440 ve 590 paslanmaz çelik sac malzemeler kullanılmıştır. Deneysel çalışma sonuçlarının, modelin güvenilirliğini kanıtlayan sonuçlarla yakından uyumlu olduğu gözlemlenmiştir [14].

Asnafi çalışmasında, 7,9 mm ile 31,3 mm arasında çeşitli kalınlıklarda ki dokuz farklı paslanmaz çelik sacın, V-kalıp ile havada bükme prosesi sonucunda geri esnemesi ve kırılması üzerine odaklanmıştır. Geri esnemeyi ve diğer kalıp parametrelerini tahmin etmek için tutarlı bir analitik model oluşturulmuşlardır. Yapılan büküm işlemlerinin hiçbirinde kırılma meydana gelmemiştir. Şekillendirme prosesinde malzemenin kırılmasının, enine kesit alanının azalmasıyla ilişkili olduğu belirtilmiştir [15].

Tekaslan vd. yaptıkları çalışmada, 25 mm x 50 mm boyutlarında 0,5; 0,75 ve 1 mm kalınlığındaki paslanmaz çelik sac malzemelerin bükme kalıplarındaki geri esnemelerini deneysel araştırmışlardır. 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° bükme açılarında geri esneme miktarı modüler bir "V" bükme kalıbı tasarlanarak elde edilmiştir. Zımbanın bükülen malzeme üzerinde daha uzun süre tutulmasının geri esnemeyi azalttığını, buna karşılık malzeme kalınlığının arttığını ve eğilme açısı geri esneme değerlerini artırdığı gözlemlenmiştir [16].

Özdemir vd. çalışmalarında, ısıl işlem görmüş Hardox 500 sac malzemelere V bükme işlemi uygulayarak şekillendirilebilirliğe karşı davranışını ve mikroyapısı üzerindeki değişimi incelemişlerdir. Hardox 500 sac malzeme aşınmaya karşı yüksek dirence sahip olmasına karşın, sert ve gevrek yapıya sahip olması sebebiyle oda sıcaklığında yapılan şekillendirme sırasında çatlak ve yırtık oluşumu gözlenen bir malzeme olduğunu belirtmişlerdir. Serbest bükme kuvveti uygulanan bükme işlemleri, zımba uç radyusu 4,5 mm ve 60° 'lik bükme açısında, 850°, 900°, 950° ve 1000 °C'de gerilim giderme ısıl işlemi uygulanmış numuneler ile gerçekleştirilmiştir. Sac malzemenin ısıl işlem uygulanmamış olarak oda sıcaklıklarında bükülmesi neticesinde makro boyutta derin çatlaklar oluştuğu ancak ısıl işleme tabi tutulan numunelerin mikroyapıları gözlemlendiğinde deforme bölgelerde iri ve ufak boyutta çatlak oluşmadığını belirtmişlerdir. Isıl işlem sıcaklıklarındaki değişimini geri ve ileri esneme davranışı üzerinde homojen bir etkiye sahip olmadığını belirtmişlerdir. 900 ºC, 950 ºC ve 1000 ºC'de ısıl işlem görmüş numunelerin mikroyapılarında perlit oluşumun homojen olarak dağıldığı tespit edilmiştir [17].

Trzepiecinski ve Lemu çalışmalarında, soğuk haddelenmiş anizotropik çelik sacların geri esneme tahminlerinin sonuçlarını, bir genetik algoritma (GA) ile birleştirilmiş çok katmanlı algılayıcı tabanlı yapay sinir ağına (YSA) dayalı bir yaklaşım kullanarak sunmuşlardır. Çalışmalarında 2 mm kalınlığında DC04 sac malzemenin tek eksenli çekme testlerinde elde

edilen mekanik özelliklerini YSA' ya girdi parametreleri olarak kullanmışlardır. Hadde yönü boyunca kesilen numunelerin, hadde yönüne çapraz kesilen numunelere göre daha yüksek geri esneme katsayısı değerleri sergilediği bulunmuştur. GA tabanlı analiz ile, Young modülü ve UTS'nin geri esneme katsayısı üzerinde önemli bir etkisi olmadığı belirtilmiştir [18].

Umur vd. çalışmalarında, otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılan DP600 ve DP780 çeliklerinin V bükümdeki geri / ileri esneme davranışlarını deneysel incelenmiştir. Bu çalışma için, 1,2 mm, 1,6 mm ve 2,0 mm kalınlıklarında farklı sac malzemeler kullanılmıştır. Deney parametreleri olarak; kalıp/zımba yarıçapı, bükme açısı ve haddeleme yönü dahil olmak üzere farklı parametre kombinasyonları kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiş ve elde edilen ölçümlerden, DP780 çeliğinin DP600'den daha yüksek geri esneme değerleri sergilediğini görülmüştür. Geri esneme değerinin, artan malzeme kalınlığı ve eğrilik yarıçapı ile azaldığı belirtilmiştir [19].

Carden vd. sürtünme katsayısının ve büküm radyusu/malzeme kalınlığı (R/t) oranının geri esneme değerlerindeki rolünü belirlemek, mevcut simülasyon tekniklerinin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında DQSK çeliği, HSLA çeliği ve AA6022-T4 alüminyum sac malzemeler kullanmışlardır. Büküm radyusu 3,2; 6,4; 12,7 ve 25,4 mm ve R/t oranı 3 ile 17 arasında seçilmiştir. Uygulanan şekillendirme kuvveti, R/t oranının arttırılmasıyla, AA6022-T4 için önemli ölçüde azalırken ve HSLA alaşımı için neredeyse değişmemiştir. DQSK çeliği için ise, R/t'nin test edilen en küçük değerleri dahil olmak üzere bir şekillendirme kuvvetinde önemli etki yapmıştır. Sac malzemeye uygulanan yük miktarının artmasıyla geri esneme miktarlarının azaldığı ancak akma dayanımının 0,8-1,2 katı aralığında uygulanan yükler için geri esneme miktarının arttırdığı gözlemlenmiştir [20].

Romeu vd. çalışmalarında sabit parametrelerin geri esneme üzerindeki temel etkilerini belirlemeyi amaçlamışlardır. 1 ve 1,35 mm kalınlığında alüminyum alaşımı ile 1, 1,5, 2 ve 3 mm kalınlığında paslanmaz sac malzemeler ile 0,8 mm yarıçaplı bir zımba kullanılarak havada V bükme prosesi ile geri esneme grafiklerini elde etmişlerdir. Deneysel çalışmanın ilk aşamasında, çekme testleri ile malzeme karakterizasyonu yapılmıştır. Daha sonra, farklı kalınlıklardaki numuneler için bükme testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda parça geometrisi, takım geometrisi ve boyutsal olmayan parametrelerin geri esneme üzerinde

etkileri olduğunu belirtilmiştir [21].

Buang vd. havada V bükme işlemi ile zımba ve kalıp radyuslarının geri esneme değerleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar, sayısal analiz metotları kullanılarak değerlendirilmiştir. 3x30x120 mm ölçülerinde AISI 304 paslanmaz çelik numuneler, 5, 8, 9,5 ve 12,5 mm uç radyuslu zımbalar kullanılarak şekillendirilmiştir. Hem sayısal analizler hem de deney sonuçları, zımba yarıçapının geri esneme miktarını doğru oranlı olarak etkileyen bir etken olarak göstermiştir. En yüksek geri esneme 12,5 mm yarıçapındaki zımba ve 8 mm yarıçapındaki kalıp kullanılarak yapılan bükme işleminde 8° olarak belirtilmiştir [22].

Fathi vd. mikroyapıdaki martenzitik dönüşümün, AISI 304L paslanmaz çeliğinin geri esneme davranışları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bükme testleri deneysel çalışmaların yanında, LS-DYNA ve çeşitli deformasyon hızları altında martenzit hacim fraksiyonunu ve gerinimini belirlemek için MAT-TRIP programları kullanılarak simüle edilmiştir. Numunelere; 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, 105° ve 120° açılarında ve 3, 30 ve 300 mm/dk deformasyon hızlarında bükme testleri uygulanmıştır. Çalışmalar, düşük deformasyon hızı altında düşük geri esneme miktarı oluştuğunu, yüksek deformasyon hızlarında ise geri esneme miktarının arttığını göstermiştir. 300 mm/dk deformasyon hızı ile 3,81°'lik geri esneme miktarı ölçülmüştür. Diğer taraftan bükme açısının arttırılmasının martenzitik dönüşümü yoğunlaştırdığı ve daha yüksek açıda bükülen numunelerde oluşan martenzit tanelerinin büyüklüğü sebebiyle sayısal olarak martenzit miktarının daha az olduğu gözlemlenmiştir [23].

Thipprakmas ve Phanitwong sonlu elemanlar metoduyla yaptıkları çalışmalarında, Taguchi ve sapma analizi kullanarak; bükme açısı, malzeme kalınlığı ve bükme yarıçapı parametrelerinin V bükme prosesinde geri esneme miktarına etkilerini incelemişlerdir. 2,5 ve 3,5 mm'lik zımba uç radyusu, 2, 3 ve 4 mm malzeme kalınlığı ve 30°, 45°, 120° ve 135° bükülme açısı parametreleri ile A1100-O alüminyum sac numunelerin analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonucunda %83,63'lük oran ile malzeme kalınlığının geri esneme davranışı üzerinde en büyük etkiye sahip parametre olduğu belirlenmiştir [24].

Ramadass vd. Ti-Grade 2 sac levhalarının geri esneme davranışını sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel çalışmalar ile incelemişlerdir. Taguchi ortogonal dizisine dayanarak,

simülasyon ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Varyans analizi ile, proses parametrelerinin geri esneme miktarı üzerindeki etkisinin dağılımı incelenmiştir. Zımba uç radyusu 2, 4, 6 mm, kalıp genişliği 20, 30, 40 mm ve sac metal kalınlığı 0,5, 1 ve 1,5 mm olarak belirlenen deney parametreleri ile V bükme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Oluşan geri esneme miktarını etkileyen parametreler %56,65 ile sac kalınlığı, %31,87 ile zımba uç radyusu ve %9,73 ile kalıp genişliği olduğu belirtilmiştir [25].

Bükme ile şekillendirme işlemlerinde geri esneme, şekillendirilebilirliği etkileyen önemli bir faktördür. Literatürde yapılan çalışmalarda geri esneme davranışına malzeme türü, sertliği, anizotropi, Young modülü gibi malzeme özelliklerinin yanı sıra şekillendirme hızı, kalıp açısı, büküm radyusu gibi proses parametrelerinin de etkidiği tespit edilmiştir.

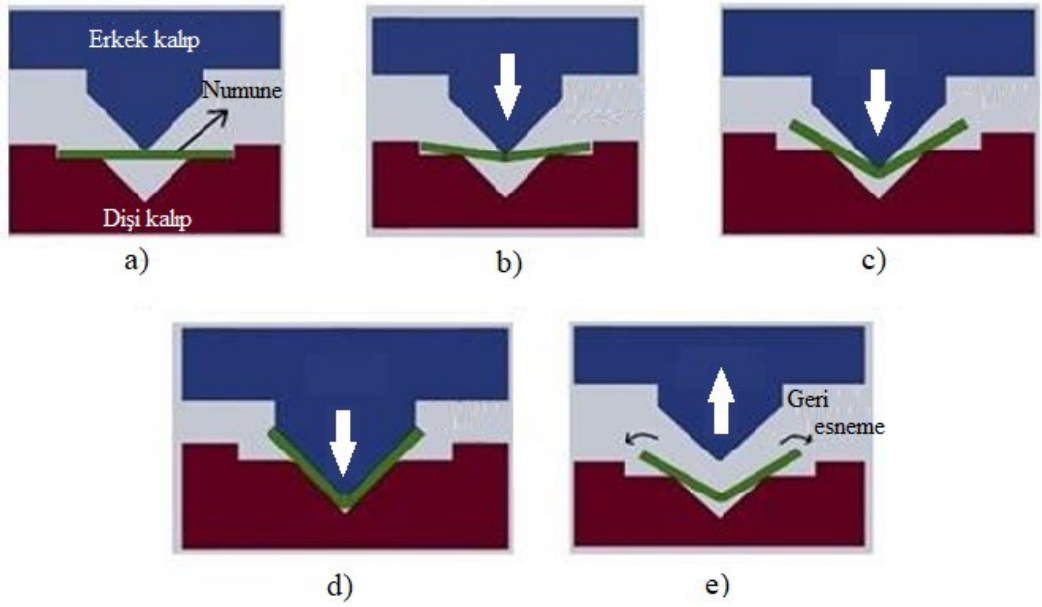
Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde 15-5 PH paslanmaz malzemeler ile yapılan çoğunlukla ısıl işlemin malzeme iç yapısına etkilerine odaklanıldığı tespit edilmiştir. Ancak 15-5 PH malzemeler kullanım yerlerine göre çok sayıda şekillendirme işlemine maruz kalmaktadır. Yapılan çalışmaların bu konuya odaklanılmamış olması literatürde büyük bir eksiklik olarak görülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada ısıl işlemin 15-5 PH malzemelere etkilerinin yanı sıra bükme ile şekillendirilebilirliğine etkilerinin de deneysel olarak belirlenmesi amaçlanmıştır.

3. TEORİK KAVRAMLAR VE KURAMSAL TEMELLER

Deneysel çalışmalarda ısıl işlemin şekillendirilebilirliğe etkileri V bükme işlemi ile incelenmiştir. Bu bölümde bükme işlemi ve geri esneme davranışı, paslanmaz çelik malzeme özellikleri ve paslanmaz çeliklere uygulanan ısıl işlemler açıklanmıştır.

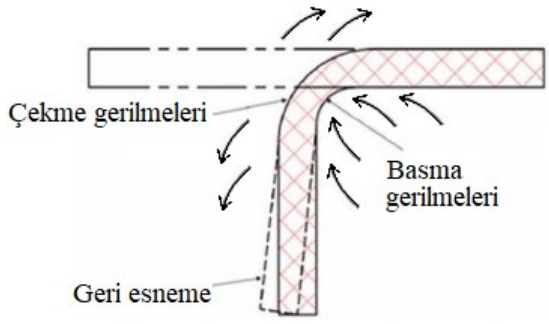
3.1. Bükme İşlemi ve Geri Esneme Davranışı

Bükme işlemi sac metal malzemeye kalıcı bir şekil verilmesi amacıyla doğrusal bir eksen etrafında uygulanan şekillendirme yöntemi olarak tanımlanabilir. Diğer bir tanım ile bükme işlemi; kalıp üzerindeki sac metal malzemenin, zımbanın sac malzemeye uyguladığı kuvvet ile zımba uç radyusu etrafında bükülmesi olarak tanımlanmaktadır. V bükme, U bükme, kenar bükme, serbest bükme çeşitleri en çok kullanılan bükme yöntemleridir. Sac levhalarda V bükme prosesinin adımları Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Proses süresince zımba hareket ederken ilk olarak sac ile temas etmektedir. (Şekil 3.1a). Zımba, büküm uygulanacak parçayı bükme ekseninden aşağıya doğru bastırmaktadır. Bu durum sonucu bükme ekseninin iki yanında kalan kısımları yukarı doğru esneyerek kalıp radyusları çevresinde çok az bir miktar hareket ederek reaksiyon gösterirler (Şekil 3.1b). Bükme olayı ilerledikçe malzemenin reaksiyonu daha da artmaktadır ve bükülen kenarlar bir önceki duruma göre daha fazla yukarıya kalkmış bulunmaktadır (Şekil 3.1c). Son safhada yalnız zımba ucu değil artık yan yüzeyleri de temas halinde ve zımba parçayı kalıp içine bastırmış durumdadır (Şekil 3.1d). Zımba sac malzeme üzerinden kaldırıldığında bükme işlemi tamamlanmaktadır (Şekil 3.1e) [26, 27].



Şekil 3.1. V bükme işleminin şematik gösterimi

Sac levhaya uygulanan bükme kuvveti kaldırıldığında, sac levhanın ilk halini almak için bir miktar elastik şekil değişimi durumu geri esneme olarak tanımlanmaktadır. Malzemede meydana gelen bu geri esneme olayı nihai üründe istenilen ölçülerin değişmesine sebep olmaktadır. Geri esnemeye uğrayan parça boyutsal olarak uygun olmadığından montaj esnasında ciddi problemlere neden olmaktadır. Geri esnemenin şematik gösterimi Şekil 3.2'de verilmiştir [28-30].



Şekil 3.2. Geri esnemenin şematik gösterimi

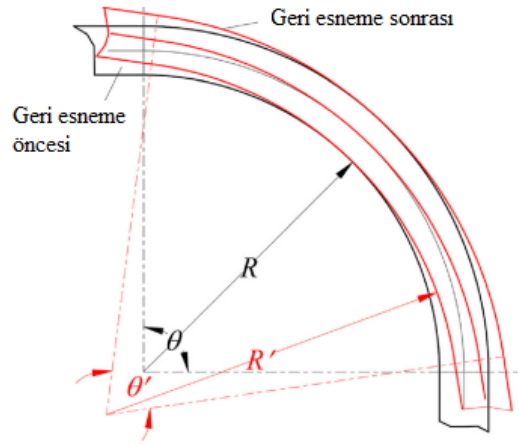
Geri esnemeyi etkileyen faktörler iki grupta incelenmektedir. Bunlardan ilki malzeme özellikleri, ikincisi ise işlem değişkenleridir. Malzeme özellikleri; elastikiyet modülü, akma ve çekme dayanımı, uzama, pekleşme üsteli, plastik anizotropi ve gerinme hızı duyarlılığı üsteli gibi özellikler iken, işlem parametreleri; deformasyon hızı, sıcaklık, sac ve zımba arasındaki sürtünme ve yağlama, sac baskı kuvveti, zımba uç radyusu, takım geometrisi ve

ölçüsü, malzeme kalınlığı gibi değişkenlerdir [31, 32].

Ks ile gösterilen geri esneme faktörü, istenilen ve elde edilen açılar arasındaki orandır. Bir geri esneme faktörü olan Ks=1 geri esneme bulunmadığı anlamına gelmektedir. Geri esneme kavramına göre, bükülmüş profilin geri esneme açısı Eşitlik 3.1'de görüleceği üzere $\Delta\theta$ şeklinde hesaplanabilir;

$$\Delta\theta = \theta' - \theta \tag{3.1}$$

Bura da θ ve θ', Şekil 3.3'te gösterildiği gibi sırasıyla geri esneme öncesi ve sonrası bükme açılarıdır [33, 34].



Şekil 3.3. Bükme işleminde geri esnemenin taslak gösterimi

3.2. Paslanmaz Çelikler

Korozyona karşı yüksek dirence sahip alaşımlı çeliklerdir. Paslanmaz çeliklerin temel alaşım elementi, genellikle %15'ten fazla olan Cr'dur. C ise dayanımı artırmak ve sertleştirmek için kullanılırken, metalin korozyona karşı dayanımını azaltmaktadır. Korozyon direncine ek olarak, paslanmaz çelikler dayanıklılık ve süneklikleriyle de bilinmektedir. Paslanmaz çelikler geleneksel olarak, ortam sıcaklığında alaşımda bulunan baskın alaşım fazına göre gruplandırılmaktadır [35].

3.2.1. Östenit paslanmaz çelikler

Yaklaşık %18 Cr ve %8 Ni'den oluşan tipik bir bileşime sahiptir ve korozyona en dayanıklı olan paslanmaz çelik grubudur. Manyetik değildirler ve çok sünektirler; ancak önemli çalışma sertleşmesi gösterirler. Östenitik paslanmaz çelikler, kimyasal ve gıda işleme ekipmanlarının yanı sıra yüksek korozyon direnci gerektiren makine parçalarının imalatında kullanılır. 303 (1.4305), 304 (1.4301), 304L (1.4307), 316 (1.4401), 316L (1.4404), 316Ti (1.4571), 321 (1.4541) gibi paslanmaz çelikler bu gruba örnek olarak verilebilir [36].

3.2.2. Ferritik paslanmaz çelikler

Yaklaşık %15 ila %20 krom içerir, düşük karbonludur ve nikel içermez. Bu, oda sıcaklığında bir ferrit fazı sağlar. Ferritik paslanmaz çelikler manyetiktir ve östenitiklere göre daha az süneklik gösterir ve korozyona karşı dayanıklıdırlar. Bu çelik grubundan yapılan parçalar, mutfak gereçlerinden jet motoru bileşenlerine kadar çeşitlilik göstermektedir. 430 (1.4016), 430F (1.4105), 446 (1.4762) gibi paslanmaz çelikler bu gruba örnek olarak verilebilir [37].

3.2.3. Martenzitik paslanmaz çelikler

Ferritik paslanmaz çeliklerden daha yüksek karbon içeriğine sahiptir, bu nedenle ısıl işlem ile dayanımları arttırılabilir. %18 kadar Cr içerirler ancak Ni içermezler. Güçlü, sert ve yorulmaya dirençlidirler, ancak genel olarak diğer iki grup kadar korozyona dayanıklı değildirler. 410 (1.4006), 416 (1.4005), 4122 (1.4122), 4313 (1.4313) gibi paslanmaz çelikler bu gruba örnek olarak verilebilir [38].

3.2.4. Çökeltme sertleşmeli paslanmaz çelikler

Alüminyum, bakır, titanyum ve molibden gibi küçük miktarlarda ek alaşım elementleri ile tipik olarak %17 Cr ve %7 Ni bileşimine sahip olan çeliklerdir. Bu grubun en ayırt edici özelliği, çökeltme sertleştirmesi ile mekanik özelliklerinin artmasıdır. Mukavemet ve korozyon direncini yüksek sıcaklıklarda koruması sayesinde, bu alaşımlar havacılık uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. 17-4 PH (630 - 1.4542), 15-5 PH (1.4545 - 1.4548), PH 13-8 Mo (1.4534) gibi paslanmaz çelikler bu gruba örnek olarak verilebilir [39, 40].

3.2.5. Dubleks paslanmaz çelikler

Östenit ve ferritin kabaca eşit miktarlarda karışımından oluşan bir yapıya sahiptir. Korozyon dirençleri östenitik kalitelere benzemektedir ve stres-korozyon çatlağına karşı gelişmiş bir direnç göstermektedirler. 1.4462 (SAF 2205), 1.4410 (S32750) süper dubleks gibi paslanmaz çelikler bu gruba örnek olarak verilebilir [41].

3.3. Paslanmaz Çeliklere Uygulanan Isıl İşlem Yöntemleri

Çeliğin ısıl işlemi, imalat sürecinde ısıl işlemin yapıldığı aşamaya bağlı olarak iş parçalarının işlenebilirliğini ve şekillendirilebilirliğini artırılmakta, parçaların artık gerilmelerini uzaklaştırılmakta ve parçaların mekanik özelliklerini iyileştirilmektedir. Isıl işlem, dört temel safhadan oluşmaktadır. Bu safhalar belirli bir sıcaklığa ulaşıncaya kadar ısıtma, ısıtılan sıcaklıkta çeşitli sürelerde bekletme, çeşitli yöntemlerle soğutma ve temperleme safhalarıdır. Bütün ısıl işlem yöntemlerinde bu dört ana safha geçerli olmaktadır. Fakat uygulanan ısıl işlem türüne göre, ısıl işlem sıcaklığı, bekletme süresi, ısıtma ve tutma hızı gibi parametreler değiştirilmektedir. Uygulanan ısıl işlem çeşidine göre işlem ya bir çevrim yapılarak bitirilmekte ya da birbirini izleyen birkaç ısıl çevrim yapılarak ısıl işlem tamamlanmaktadır [42-45].

Paslanmaz çelik malzemelerin ısıl işlem sürecindeki ilk adımı, çeliği östenitleme sıcaklığına kadar ısıtmaktır. Ardından çelik, ferrit oluşumunu önlemek ve nispeten sert bir dönüşüm ürünü olan martenzit oluşumunu en üst düzeye çıkarmak için hızlı bir şekilde soğutularak istenen sertliğe ulaştırılmaktadır. Östenit, yüzey merkezli kübik gama demirde (γ-Fe) C veya diğer elementlerin katı bir çözeltisidir. Sertleşmeden önce üretilmesi istenen katı çözeltinin mikroyapısını oluşturmaktadır. Martenzitik dönüşüm, östenitik durumdan su verme sırasında, bir çeliğin soğuma hızı yeterince yüksek olduğunda, perlit ve beynit dönüşümleri baskılanacak şekilde meydana gelmektedir. Dönüşüm difüzyonsuz olduğundan, martenzitin bileşimi, oluşturulduğu östenitin bileşimi ile aynıdır. Martenzit, enine kesitte iğne benzeri veya silindirik benzeri görünebilmektedir [38, 46].



Şekil 3.4. Östenit ve Martenzit yapıların şematik gösterimi

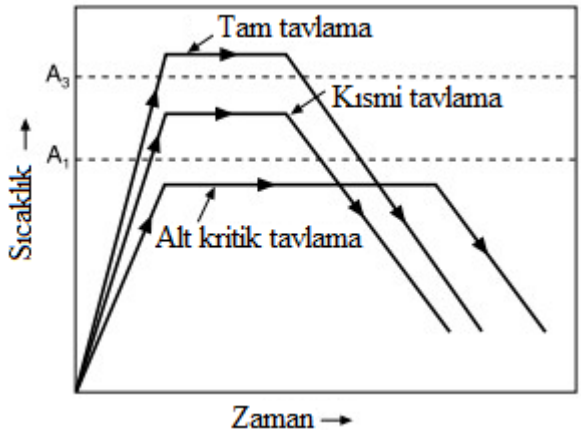
3.3.1. Paslanmaz çeliklerde tavlama ısıl işlemi

Tavlama ısıl işlemi; istenilen sıcak değerine getirilen malzemenin bu sıcaklıkta belirli bir süre bekletilmesi ve ardından yavaş bir şekilde soğutulması adımlarından oluşmaktadır. Bu işlem için uygun sıcaklık ve süre; çeliğin kimyasal bileşimi, tane boyutu ve şekli ve istenen nihai mekanik özellikler gibi çeşitli faktörler tarafından belirlenmektedir. [47, 48].

Tavlama; iç gerilimleri azaltmak, sünekliği ve tokluğu iyileştirmek veya eski haline getirmek, işlenebilirliği geliştirmek, kimyasal düzensizliği ortadan kaldırmak, tane boyutunu iyileştirmek ve gaz içeriklerini azaltmak gibi farklı birçok amaç için uygulanmaktadır [49].

Tavlama işlemi, işlem sıcaklığına, işlem sırasında meydana gelen faz geçişlerine ve işlemin amacına göre tam tavlama, kısmi tavlama ve kritik altı tavlama olmak üzere üç sınıfa ayrılabilmektedir. Tam tavlamada çelik, üst kritik sıcaklığın (A_3) üzerinde bir sıcaklığa ısıtılmakta ve ardından çok yavaş bir şekilde soğutulmaktadır. Kısmi tavlamada ise çelik, alt kritik sıcaklık (ötektoid dönüşüm, A_1) ile A_3 arasında uzanan bir sıcaklığa kadar ısıtılmakta ve ardından da tavlama sıcaklığından çok yavaş bir şekilde soğutulmakta veya tüm östenitin perlite dönüştüğü bir sıcaklıkta veya üzerinde bir sıcaklıkta havada soğutulmaktadır. Alt kritik tavlama, çeliğin ısıtıldığı maksimum sıcaklığın her zaman A_1 daha düşük olduğu bir işlem olarak tanımlanmaktadır. Alt kritik tavlamada faz dönüşümü gerçekleşmemektedir. Bu süreçte yalnızca geri kazanım, yeniden kristalleşme, tane büyümesi, karbür aglomerasyonu veya yumuşama gibi termal olarak aktive olan olaylar meydana gelmektedir. Kritik altı tavlamada, pratik olarak mikroyapı ve nihai özellikler söz konusu olduğunda

hiçbir değişiklik olmadığından dolayı soğuma hızının çok az etkisi olmaktadır. Bu süreçler Şekil 3.5' te belirtilmiştir [50, 51].



Şekil 3.5. Tavlama sıcaklığa bağlı olarak sınıflandırılmış tavlama çeşitleri

Özel amaca bağlı olarak uygulanan tavlama işlemleri aşağıda verilmiştir.

Küreselleştirme tavı

Küreselleştirme ısıl işlemi, çelikleri A_1 sıcaklık çizgisi civarında uzun süre tuttuktan sonra yavaş soğuma ile karbürlerin küresel şekle dönüştürülmesi işlemi olarak tanımlanmaktadır. Sert ve gevrek sementit fazlarının işlenmesini kolaylaştırmak ve sünekliğini artırmak amacıyla da küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmaktadır. Küreselleştirme tavı sıcaklığı, %0,35-0,8 C içeren düşük karbonlu çeliklerde A_1'in hemen altında (680-720 °C), %0,8'den yüksek karbonlu çeliklerde ise A_1'in üzerindedir. Çeliğin ferrit/martenzit mikroyapısı bu sıcaklıklara ısıtılarak ferrit matrisindeki karbürlerin veya sementitlerin şekli, karbon atomlarının difüzyonu ile küresel hale gelmektedir. Tavlama yapılarak gerçekleşen küreselleştirme ısıl işlemiyle süneklikleri, darbe toklukları, yorulma özellikleri ve işleme özellikleri önemli oranda geliştirilebilir [52-54].

Küreselleştirme işlemi, daha çok yüksek karbonlu çeliklere uygulanmaktadır. Küreselleştirme işlemi esnasında bekletme süresi önemlidir. Malzeme, olması gerekenden daha uzun süre ısıya temas halinde bırakılırsa sementit partikülleri birleşerek uzama gösterir ve bu durum çeliğin işlenebilme yeteneğini olumsuz etkilemektedir [55].

Gerilim giderme tavı

Yüksek ısıya maruz kalan parçaların iç yapılarında ihmal edilemeyecek seviyelerde ön gerilmeler oluşmaktadır. Kontrol edilemeyen ve düzensiz ön gerilmeler ise, malzemenin istenen dayanım özelliklerin yitirilmesine yol açmaktadır. Özellikle kaynak ile birleştirme yapılan parçalarda kaynak dolgunun genel olarak uygulama yapılan malzemeye göre dayanımlı olması sebebiyle, kaynaklı bölgeye yakın yerlerde iç gerilmeler ile karşılaşılabilmektedir. Gerilim giderme tavlaması ortadan kaldırmak veya bu gerilmeleri azaltmak amacıyla uygulanan ısıl uygulamalardır [56, 57].

Gerilim giderme tavlaması; sıvı metallerin katılaşması, sıcak şekillendirme, sertleştirme veya kaynaklama sırasında oluşan artık gerilmeleri gidermek amacıyla, malzemenin A_1'in altında bir sıcaklığa ısıtılıp ardından yavaş soğuması işlemidir [58].

Normalleştirme tavı

Normalizasyon, çeliklerin kritik tavlama sıcaklığı üzerine ısıtılması ve havada soğutulması işlemlerini kapsamaktadır. Normalizasyon ötektoid altı ve ötektoid üstü çeliklerin her ikisi için üst kritik sıcaklık üzerinde uygulanabilmektedir. Çeliğin normalleştirilmesi neticesinde, tavlamadan daha sert ve mukavemetli çelik, işlenebilirlik, tane yapısının modife edilmesi ve inceltilmesi, çekme mukavemeti ve sertlikte azalma olmaksızın, nispeten iyi süneklik elde edilmektedir [59].

Normalizasyon ısıl işlemine tabi tutulan çeliğin mikroyapısı, diğer tüm ısıl işlem koşullarına kıyasla daha küçük östenit tane boyutuna sahip olmaktadır [60].

3.3.2. Paslanmaz çeliklerde solüsyona alma ısıl işlemi

Su verme işlemi, çeliklerin A_3 veya A_1 üzerindeki belli bir sıcaklıktan, yüzeyde veya aynı zamanda kesitte önemli bir sertlik artışı sağlayacak bir hızla soğutulması olarak tanımlanmaktadır. Böylece genellikle martenzite dönüşen içyapıda ferrit ve perlit oluşumu engellenmektedir. Su verme genel olarak hızlı soğutma veya çelikler için sertleştirme (dönüşüm sertleştirmesi) anlamına da gelmektedir [61].

Soğutma hızı, solüsyona alma işlemi yapılacak olan iş parçasının boyutuna, sertleşebilme kapasitesine ve solüsyon ortamına bağlı olmaktadır. Isıl işlem prosesi esnasında, iş parçasının merkezi yüzeyine göre daha yavaş soğumaktadır. Soğuk olan yüzey kısmı büzülürken, daha az soğuk olan merkez bölgeler daha geniş hacimde kalırlar ve bu nedenle parça yüzeyinde çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Oluşan bu gerilmeler ise parçada çarpılma, çatlama ve hatta kırılmalar oluşturabilmektedir. Parçada bu gibi olumsuzlukların oluşmaması amacıyla soğutma hızı olması gerekenden yüksek olmamalıdır [62].

3.3.3. Paslanmaz çeliklerde temperleme ısıl işlemi

Sertleştirme sonrası çeliğin iç yapısında %70 martenzit, %10 çözünmemiş karbür ve %20 artık östenit bulunmaktadır. Yapıdaki martenzit çeliğe sertlik ve bu sebeple kırılganlık verirken, kalıntı östenitin yumuşaklığı sebebiyle iç yapıda bir dengesizlik oluşmaktadır. Kalıntı östenitin sertliğe olumsuz etkisini martenzite dönüştürerek gidermek ve gevrek martenzit fazının tokluğunu arttırmak amacıyla menevişleme ısıl işlemi uygulanmaktadır [63].

Menevişleme işleminde, menevişleme sıcaklığının artmasıyla yorulma direnci artmaktadır. Bunun sebebi olarak ise menevişleme işlemi ile artık gerilmelerin giderilmesi ve malzemenin tokluk kazanması gösterilmektedir. Ancak menevişleme sıcaklığı belli bir sıcaklığın üstüne çıktığında tane yapısında bozulmalar meydana gelmekte ve yorulma dayanımı düşmeye başlamaktadır [64].

3.3.4. Paslanmaz çeliklerde çökelme sertleşmesi ısıl işlemi

Martenzitik paslanmaz çelikler (PH) yüksek mukavemetleri, korozyon dirençleri ve nispeten iyi süneklikleri sayesinde havacılık endüstrisinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çelikler alfa-ferrit olarak katılaşmalarına rağmen, soğuma aşamasında önce östenite ve ardında da aşırı soğuma ile martenzite dönüşmektedir. Bu nedenle, mikroyapıda yaklaşık olarak %10-20 oranında alfa-ferrit ve az miktarda östenit içeren martenzitik bir fazdan oluşmaktadır. Martensetik paslanmaz çeliklere uygulanan ısıl işlem, mikroyapıdaki düzensizlikleri gidermek için bir homojenleştirme adımından, ardından martenzitik bir yapı elde etmek için çözündürme ısıl işlemi ve yaşlandırma işleminden oluşmaktadır. Yaşlandırma ısıl işlemi, ince nanometrik boyutlu çökeltilerin oluşumunu sağlamak için 723 ile 923 °K arasındaki

sıcaklıklarda 1 ila 5 sa arasında bekletilerek gerçekleştirilmektedir. Bu işlem sırasında mikroyapıda oluşan BCC bakır çökeltileri alaşımın dayanımını artırmaktadır. Isıl işlemden etkilenen bölgelerdeki (HAZ) matriks yapısının son hali ve çökelmeler malzemenin son kondisyonundaki mekanik özelliklerini oluşturmaktadır [65, 66].

4. MATERYAL METOD

Tez çalışması kapsamında öncelikli olarak deney malzemelerinin karakterizasyonu yapılmıştır. Daha sonraki aşamada deneysel çalışmalar için deney numuneleri hazırlanmış ve deney parametrelerine göre ısıl işlemler yapılmıştır. Son aşamada da deneysel çalışmalar tamamlanmıştır.

Tez çalışması kapsamında yapılan deneylerde, Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği bölüm laboratuvarlarında bulunan PID kontrollü ısıl işlem fırını, bilgisayar kontrollü deney düzeneği ile bükme kalıpları ve geri esneme değerlerinin ölçümü için CMM tezgahı kullanılmıştır.

4.1. Deney Malzemesinin Karakterizasyonu

Paslanmaz çelikler, östenitik paslanmazlar, ferritik paslanmazlar, martenzitik paslanmazlar, dubleks paslanmazlar ve çökertmeyle sertleştirilmiş paslanmazlar olarak farklı mikroyapılarda ve mekanik özelliklerde beş ana grup altında toplanmaktadır. Çökelme sertleşmeli (PH) paslanmaz çeliklerin martenzitik, yarı östenitik ve östenitik olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Çökelme yoluyla sertleşebilen ve martenzitik paslanmaz olan 15-5 PH çeliği üstün mekanik özellikleri ve iyi korozyon direnci sebebiyle havacılık, uzay ve deniz endüstrilerinde, petrol ve kimya uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. 15-5 PH çeliği EN normuna göre 1.4545 ve 1.4548 olarak ya da X5CrNiCuNb15-5, UNS normuna göre ise S15500 olarak adlandırılmaktadır [67].

15-5 PH alaşımının, sahip olduğu yüksek sertlik değeri ve mekanik özellikleri nedeniyle, soğuk şekillendirilmesi oldukça zordur. Bu nedenle, şekillendirme sonucu oluşan yüksek geri esneme değerlerini azaltmak ve nihai şekle yakın parçalar üretmek için ısıl işlem gerekebilmektedir. Bu sayede, 15-5PH alaşımından, değişen sıcaklık ve sürelerde uygulanan ısıl işlemler ile farklı mekanik özelliklere ve kullanım alanlarına sahip kondisyonlar oluşturulabilmektedir.

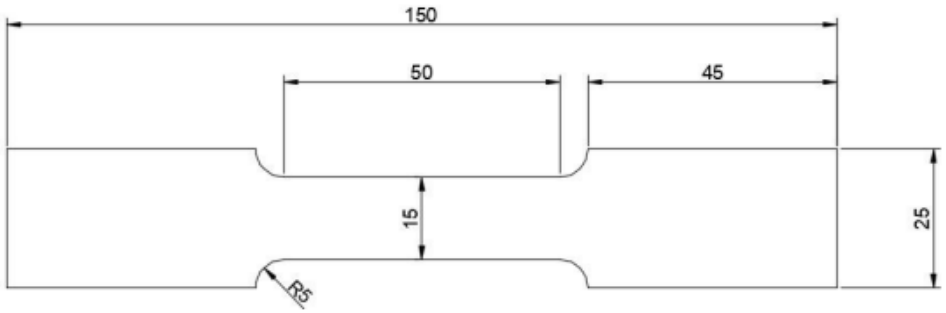
Yapılan deneysel çalışmada; alaşımın ilk hali olan 1,6 mm kalınlığında 15-5 PH Con A sac levha malzeme kullanılmıştır. Con A ‘daki malzemenin yapılan kimyasal analiz testi sonucu

elde edilen kimyasal bileşimi de Çizelge 4.1′de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kimyasal analiz sonuçları

Element	C	Mn	Si	P	S	Mo	Cr	Ni	Cu	Diğer
Ref %	0,07 max	1,00 max	1,00 max	0,030 max	0,015 max	0,50 max	14,00-15,50	3,50-5,50	2,50-4,50	Kalan
Deney numunesi	0,04	0,53	0,36	0,23	0,001	0,26	15,28	5,14	3,23	Kalan

Deney numuneleri, sac malzemeden 0° hadde yönünde 20 mm x 40 mm ölçülerinde ve çekme numuneleri ise ASTM-E8M standardına uygun olarak ısı girdisini engellemek için su jeti ile kesilerek hazırlanmıştır. Çekme numunesinin teknik ölçüleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Çekme testi için numune ölçüleri (ASTM-E8M)

4.2. Deneysel Çalışma Parametreleri

Tez çalışmasında deneysel işlem parametreleri ve elde edilmesi amaçlanan sonuçlar Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Deneysel çalışma parametreleri ve elde edilmesi hedeflenen sonuçlar

Girdiler	Girdi Parametreleri		Çıktılar
Malzeme cinsi	15-5 PH	Deneysel çalışma →	• Geri esneme miktarları • Şekillendirilebilirlik • Mikroyapı değişimi
Malzeme kalınlığı	1,6 mm		
Zımba uç radyusu	2, 4, 6 mm		
Kalıp açısı	15°, 30°, 45°, 60°, 75°		
Ütüleme süresi	0, 10 sn.		
Isıl işlem sıcaklıkları	482 °C, 552 °C, 621 °C		
Isıl işlem süreleri	60 dk., 240 dk., 240 dk.		

Kesilerek hazırlanan numuneler ve çekme numunelerinin yaşlandırma ısıl işlemleri, PID kontrollü fırında gerçekleştirilmiştir. Fırınının iç hacmi 100 litre ve ısıtma odasının boyutları yükseklik, derinlik ve genişlik olmaz üzere sırasıyla 40 x 50 x 50 cm'dir. Eşit ısı dağılımı amacıyla fırın tavanında hava dağıtıcı fan bulunmaktadır. Isı kaybını engellemek için fırın kapağında seramik fitil iç hazne ve kapak içinde ise, izole tuğla kaplama bulunmaktadır. Fırının maksimum sıcaklık kapasitesi 1000˚C ve sıcaklıkta sapma ±1˚C'dir.

Deney numuneleri, PID kontrollü fırın içerisinde bulunan seramik raflara yerleştirilerek fırının kapağı kapatılmıştır. Çizelge 4.3'te verilen sıcaklık ve sürelerde kontrol ünitesi ile ısıl işleme ait programlar oluşturulmuş ve ısıl işlem sonunda alaşımın kondisyon değişimleri sağlanmıştır. Yaşlandırma sıcaklığında bekleme süresi bittikten sonra, hava dağıtıcı fanı çalışır halde fırının kapağı kapalı olarak oda sıcaklığına ulaşana kadar beklenmiştir. Yaşlandırma ısıl işleminde kullanılan fırın ve deney numunelerinin fırın içerisine yerleşimleri Şekil 4.2′de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Yaşlandırma ısıl işlemi parametreleri

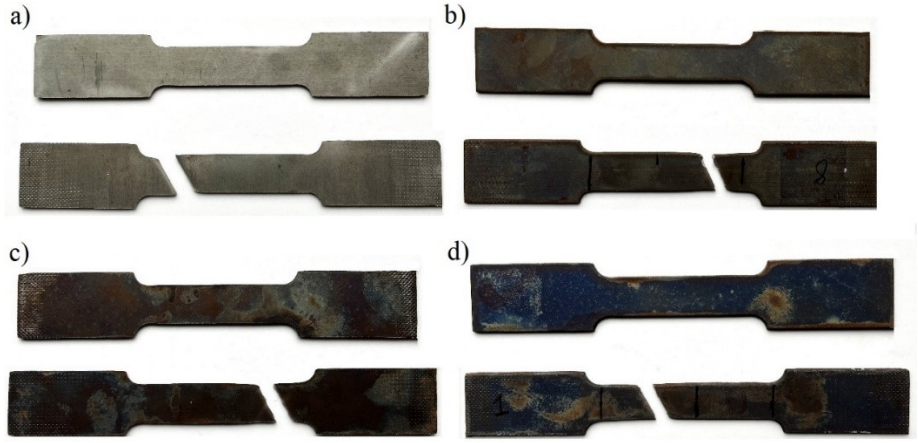
Kondisyon	Sıcaklık (°C)	Zaman (dk.)
H900	482 °C ± 6 °C	60 dk.
H1025	552 °C ± 6 °C	240 dk.
H1150	621 °C ± 6 °C	240 dk.



a) b)

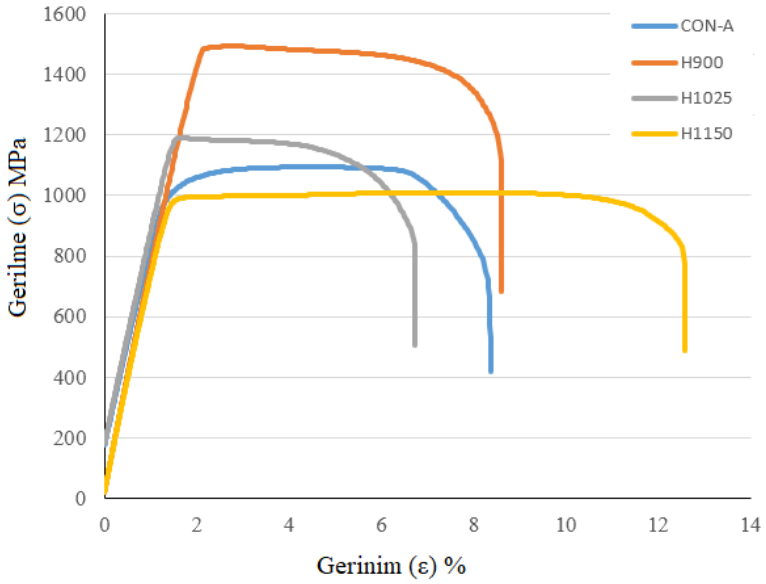
Şekil 4.2. a) PID kontrollü deney fırını b) Deney numunelerinin fırın içinde yerleşimi

Uygulanan ısıl işlemin ardından oda sıcaklığına gelmiş fırının kapağı açılmış ve V büküm çalışması için farklı kaplarda muhafaza edilmek üzere numuneler alınmıştır. Çekme numunelerinin test öncesi ve test sonrasına ait görüntüleri Şekil 4.3′te verilmiştir.



Şekil 4.3. 15-5 PH alaşımının çekeme testi numuneleri a) Con-A b) H900 c) H1025 d) H1150

Yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış çekme numuneleri ile tek eksenli çekme testleri yapılmıştır. Çekme testi sonuçlarının grafiksel gösterimi Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Yaşlandırma ısıl işlemi ile elde edilen farklı kondisyonlar için 15-5 PH alaşımının çekme testi sonuçları

Deneysel çalışma kapsamında yapılan çekme testlerinde 15-5 PH alaşımından elde edilen değerler ısıl işlem parametrelerine göre de Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Yaşlandırma ısıl işlem parametrelerine göre alaşımın mekanik özellikleri

Kondisyon	Akma gerilmesi (MPa)	Maksimum çekme gerilmesi (UTS, MPa)	Uzama (%)	Sertlik
Con A	986	1093	8,3	37 HRC
H900	1486	1489	8,5	46 HRC
H1025	1170	1183	6,7	40,3 HRC
H1150	985	1005	12,5	35,6 HRC

Gerilme-gerinim grafikleri incelendiğinde, elastik deformasyon bölgesinde, tüm kondisyonların eğrileri hızla yükselmekte ve doğrusal bir elastikiyet sergilemektedirler. Çekme numunesi üzerinde oluşan gerilim malzemenin akma gerilimini aştığında, tüm kondisyonları için oluşan eğriler sabit bir eğilim göstermektedir ve belli bir UTS değerine ulaştığında ise kopma gerçekleşmektedir. Malzemenin ilk hali olan Con A numunesi için yapılan çekme testi sonucunda 1093 MPa büyüklüğünde bir UTS değeri görülmektedir.

482 ºC sıcaklıkta 60 dk bekletilen H900 kondisyonun UTS değeri yaklaşık %35 artış ile 1489 MPa değerine ulaşmıştır. Bu ısıl işlem parametresinin alaşımın akma dayanımında önemli artışa neden olduğu ancak % uzamanın yani sünekliğin hemen hemen aynı kaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum literatür ile de benzerlik göstermektedir. Uygulanan sıcaklık ve yaşlandırma süresi arttırıldığında kazanılmış olan bu yüksek mekanik değerlerin azalmaya başladığı gözlemlenmektedir [68].

552 ºC ve 240 dk aşırı yaşlandırma işlemine tabi tutulan H1025 kondisyonunda UTS değeri 1183 MPa ölçülmüştür. Ayrıca bu kondisyon en az uzama değeri gösteren kondisyondur. 621 ºC ve 240 dk aşırı yaşlandırma sonucunda elde edilen H1150 kondisyonu en düşük UTS değerine ve en yüksek gerinim değerine sahip kondisyondur. H1150 kondisyonuna ait UTS ve gerinim oranları sırasıyla 1005 MPa ve %12,5'dir.

Yaşlandırma sonucunda elde edilen kondisyonların mekanik özelleri incelendiğinde; maksimum sertlik ve yüksek mukavemet gerektiren uygulamalar için H900, daha iyi tokluk ve korozyon çatlamasına karşı daha yüksek direnç için H1025, daha yumuşak bir malzeme

ile soğuk işlemeye uygun kondisyon için ise H1150 kondisyonun uygun olduğu gözlemlenmiştir [69].

4.3. Deney Düzeneği ve Deneysel Çalışma Ortamı

V bükme işlemi, Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği laboratuvarındaki bilgisayar kontrollü deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinin genel görünümü Şekil 4.5'te ve teknik özellikleri de Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Deney düzeneğinin alt kalıbında bulunan 20 mm genişliğinde ki yuva sayesinde, deney numunelerinin dönük yerleştirilmesinden kaynaklı hataların önüne geçilmiş ve numuneler ortalı olarak kalıp üzerine yerleştirilmiştir. Şekillendirme işlemi boyunca; hidrolik ünite ile uygulanan bükme kuvveti ve süre parametreleri, bilgisayar yazılımının grafik ekranından eş zamanlı olarak izlenmiştir. Şekil 4.6'da deney cihazı kontrol yazılımının ekran görüntüsü verilmiştir.



a) b)

Şekil 4.5. a) Deney düzeneğinin genel görünümü b) Deney düzeneği detay görünümü

Çizelge 4.5. Deney düzeneğinin teknik özellikleri [70]

Hidrolik Sistem	Maksimum sistem basıncı	25 MPa
	Minimum sistem basıncı	1 MPa
	Motor gücü	15 kW
	Pompa debisi	32 lt/dk
	Deformasyon hızı(max)	18 mm/sn
Şekillendirme ünitesi	Piston çapı	200 mm
	Kurs boyu	200 mm
	Piston adedi	1
	Cetvel boyu	300 mm



Şekil 4.6. Deney yazılımının ekran görüntüsü

4.4. Deney Numunelerinin Mikroyapı İncelemesi

Yaşlandırma ısıl işleminin alaşımın mikroyapısındaki etkilerini incelemek amacıyla numuneler taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla farklı yakınlaştırmalar uygulanarak incelenmiştir.

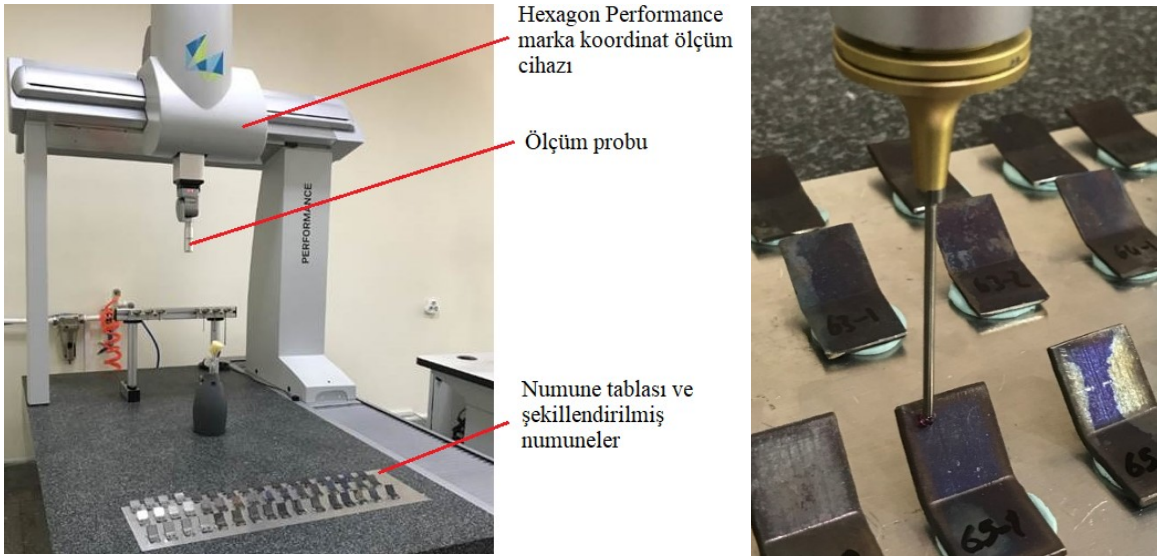
SEM ile mikroyapı görüntülemesi öncesinde deney numunelerinin bakalite alınarak parlatılması ve dağlanması işlemleri yapılmıştır. Bu hazırlığın ilk aşaması olan parlatma işleminin amacı, yüzey pürüzlülüğünün azaltılmasıdır. Böylece, ışığı iyi yansıtan bir yüzey elde edilmektedir. Bakalite alınmış deney numunelerin yüzeyi 800, 1000 ve 1200 numaralı SiC zımparalar ile sırasıyla zımparalanmıştır. Zımparalama sonrası döner bir disk üzerindeki parlatma keçeleri ve 1µm elmas pasta kullanılarak parlatma işlemi yapılmıştır. İşlem görmüş

yüzey, mikroskop ışığı altında kontrast oluşturması amacıyla %25 oranında oksalit asit ve %75 oranında saf su içeren çözelti kullanılarak dağlanmıştır.

4.5. Geri Esneme Ölçümü

Tez çalışması kapsamında V bükme yöntemi ile şekillendirilmiş deney numunelerinin geri esneme değerleri, Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği laboratuvarında bulunan Hexagon Performance marka CMM tezgahı kullanılarak ölçülmüştür. Şekil 4.7'de CMM ile geri esneme ölçümü çalışma ortamı verilmiştir.

Ölçme işlemi için ilk olarak şekillendirilmiş deney numuneleri bir plaka üzerine sabitlenmiştir. Ardından, cihazın probu büküm yüzeylerinden sırasıyla 3 farklı noktaya dokundurulmuş ve iki düzlem oluşturulmuş, oluşan iki düzlem arasındaki açı ölçülmüştür. Ölçülen açı ile büküm açısı arasındaki fark geri esneme miktarını vermiştir.



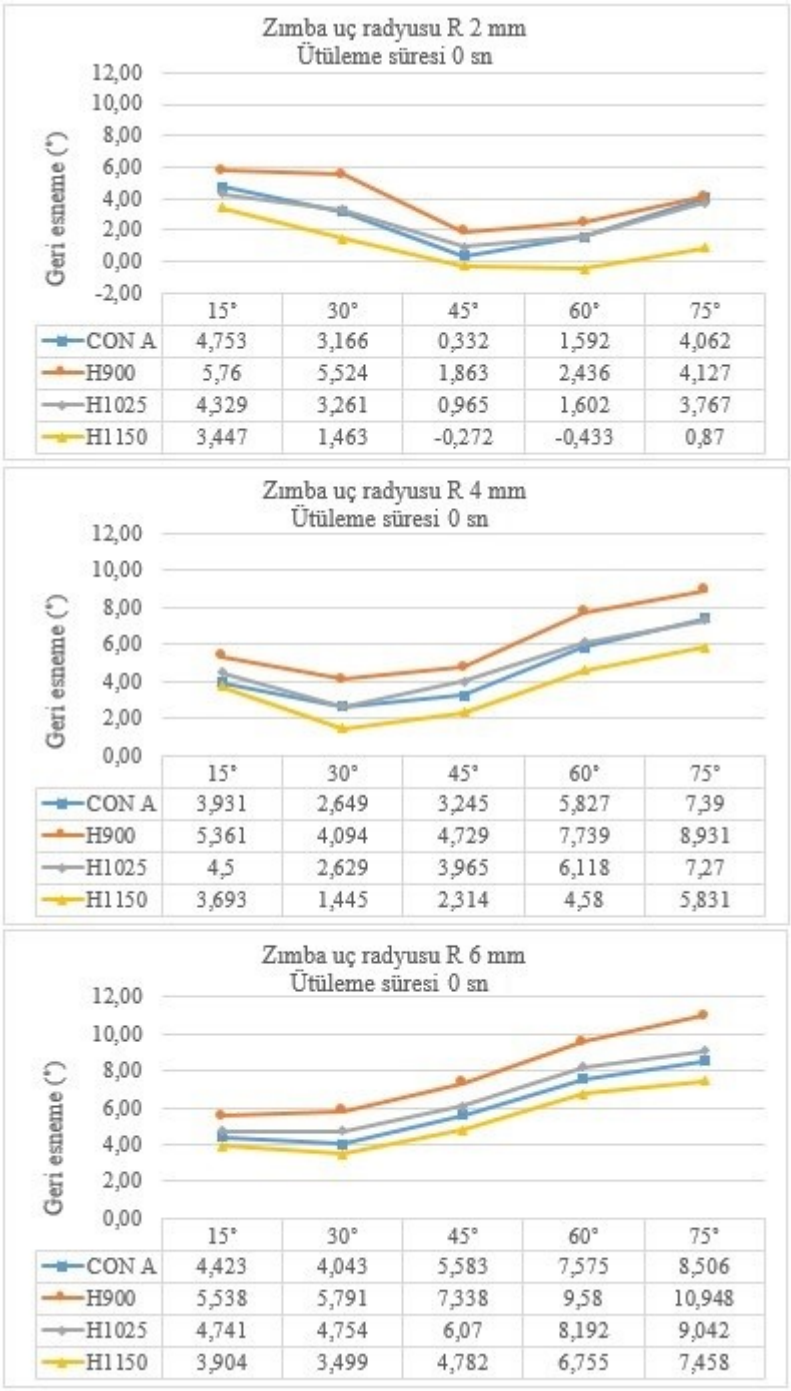
a) b)

Şekil 4.7. Geri esneme ölçümü çalışma ortamı a) CMM b) Numune ölçme işlemi

5. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmalar Çizelge 4.2'de belirtilen değişkenlere göre gerçekleştirilmiştir. Şekillendirilen deney numunelerinin ısıl işlemi parametrelerine göre sergiledikleri V bükme ile şekillendirilebilirlikleri ve şekil almış numunelerin geri esneme değerlerindeki değişim, mikroyapıdaki gözlemler ile birlikte değerlendirilerek yorumlanmıştır.

Bükülerek şekillendirilen 15-5 PH alaşımı numunelerin, V-bükme ile şekillendirilmiş numunelerin zımba uç radyusuna, ütüleme süresine, büküm açısına ve ısıl işlem parametrelerine göre elde edilmiş geri esneme grafikleri Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de verilmiştir.

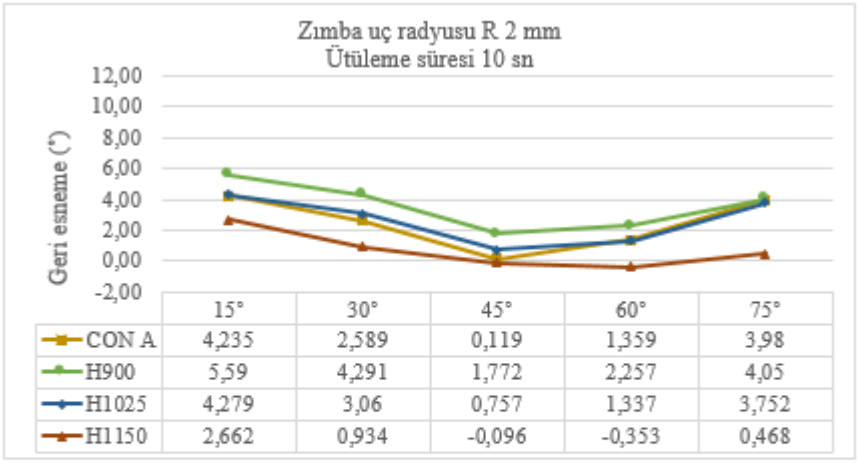


	15°	30°	45°	60°	75°
CON A	4,753	3,166	0,332	1,592	4,062
H900	5,76	5,524	1,863	2,436	4,127
H1025	4,329	3,261	0,965	1,602	3,767
H1150	3,447	1,463	-0,272	-0,433	0,87

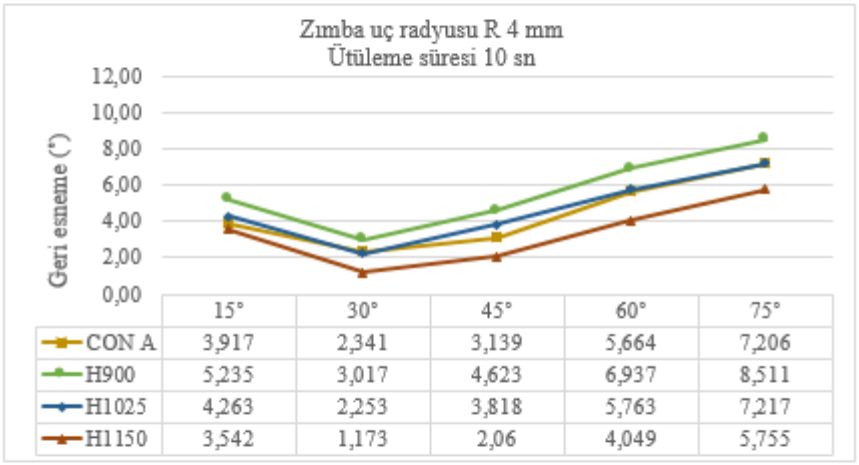
	15°	30°	45°	60°	75°
CON A	3,931	2,649	3,245	5,827	7,39
H900	5,361	4,094	4,729	7,739	8,931
H1025	4,5	2,629	3,965	6,118	7,27
H1150	3,693	1,445	2,314	4,58	5,831

	15°	30°	45°	60°	75°
CON A	4,423	4,043	5,583	7,575	8,506
H900	5,538	5,791	7,338	9,58	10,948
H1025	4,741	4,754	6,07	8,192	9,042
H1150	3,904	3,499	4,782	6,755	7,458

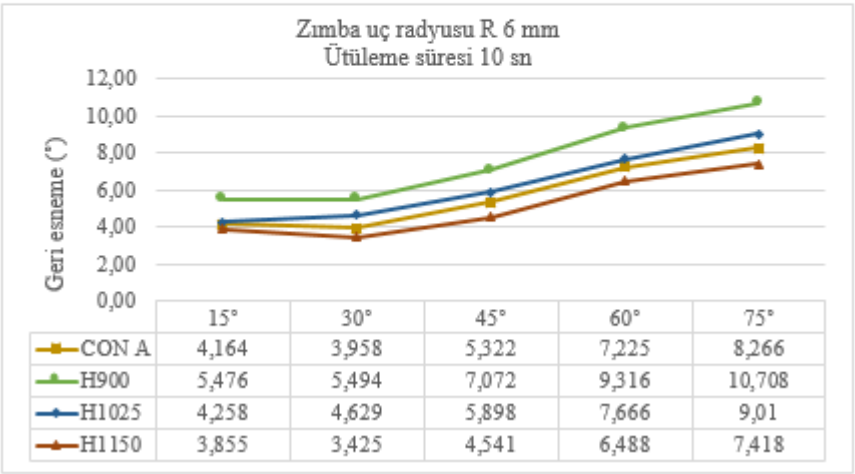
Şekil 5.1. 0 sn. ütüleme süresine göre geri esneme grafikleri



	15°	30°	45°	60°	75°
CON A	4,235	2,589	0,119	1,359	3,98
H900	5,59	4,291	1,772	2,257	4,05
H1025	4,279	3,06	0,757	1,337	3,752
H1150	2,662	0,934	-0,096	-0,353	0,468



	15°	30°	45°	60°	75°
CON A	3,917	2,341	3,139	5,664	7,206
H900	5,235	3,017	4,623	6,937	8,511
H1025	4,263	2,253	3,818	5,763	7,217
H1150	3,542	1,173	2,06	4,049	5,755



	15°	30°	45°	60°	75°
CON A	4,164	3,958	5,322	7,225	8,266
H900	5,476	5,494	7,072	9,316	10,708
H1025	4,258	4,629	5,898	7,666	9,01
H1150	3,855	3,425	4,541	6,488	7,418

Şekil 5.2. 10 sn. ütüleme süresine göre geri esneme grafikleri

Bükülerek şekillendirilen 15-5 PH alaşımı numunelerin ölçülen esneme miktarları ütüleme sürelerine göre açıklanmıştır. Soğutma ortamına getirilen yenilikten dolayı tüm zımba uç radyuslarında ve kondisyonlarda numuneler kırılma ya da çatlama gibi deformasyon kusuru göstermeden şekillendirilebilmiştir.

5.1. 0 sn. Ütüleme Süresinde Şekillendirilebilirlik Sonuçları

Uç radyusu 2mm olan zımba ile şekillendirilen numuneler incelendiğinde şekillendirme açısının artmasıyla 45º ye kadar bir düşüş ardından 60 ve 75º açılarda artış görülmektedir. Bu parametredeki en düşük geri esneme değeri H1150 kondisyonunda -0,272º (ileri esneme) ve en yüksek ise H900 kondisyonunda 5,76º'dir. Ayrıca, 2 mm uç radyusu ile şekillendirilen tüm kondisyonlar için optimum büküm açısı ise 45º'olarak belirlenmiştir.

Uç radyusu 4mm'ye çıkarıldığında, tüm kondisyonlardaki numunelerin 30º şekillendirme açısından sonra geri esneme değerlerinde artış gözlemlenmiştir. En düşük geri esneme değeri 30º kalıp açısında H1150 kondisyonunda 1,445º olarak ölçülmüştür. En yüksek geri esneme değeri ise H900 kondisyonunda 75º büküm açısında 8,931º'dir. 4 mm uç radyusu ile şekillendirilen tüm kondisyonlar için optimum büküm açısı ise 30º'dir.

Uç radyusu 6mm olan zımba ile şekillendirilen numuneler 30º şekillendirme açısından sonra çok yüksek geri esneme değerleri sergilemiştir. Bu parametredeki en düşük ve en yüksek geri esneme değerleri sırasıyla 30º şekillendirme açısında H1150 kondisyonunda 3,499º ve 75º şekillendirme açısında H900 kondisyonunda 10,948º'dir.

5.2. 10 sn. Ütüleme Süresinde Şekillendirilebilirlik Sonuçları

2 mm uç radyuslu zımba ile şekillendirilen numuneler incelendiğinde, 0 sn ütüleme süresi sonuçlarına benzer olarak, şekillendirme açısının artmasıyla 45º ye kadar bir düşüş ardından 60 ve 75º açılarda artış görülmektedir. Bu parametredeki en düşük geri esneme değeri H1150 kondisyonunda -0,096º (ileri esneme) ve en yüksek ise H900 kondisyonunda 5,59º'dir.

Uç radyusu 4mm'ye çıkarıldığında, tüm kondisyonlardaki numunelerin 30º şekillendirme açısından sonra geri esneme değerlerinde artış gözlemlenmiştir. En düşük geri esneme değeri 30º kalıp açısında H1150 kondisyonunda 1,173º olarak ölçülmüştür. En yüksek geri esneme değeri ise H900 kondisyonunda 75º büküm açısında 8,511º'dir.

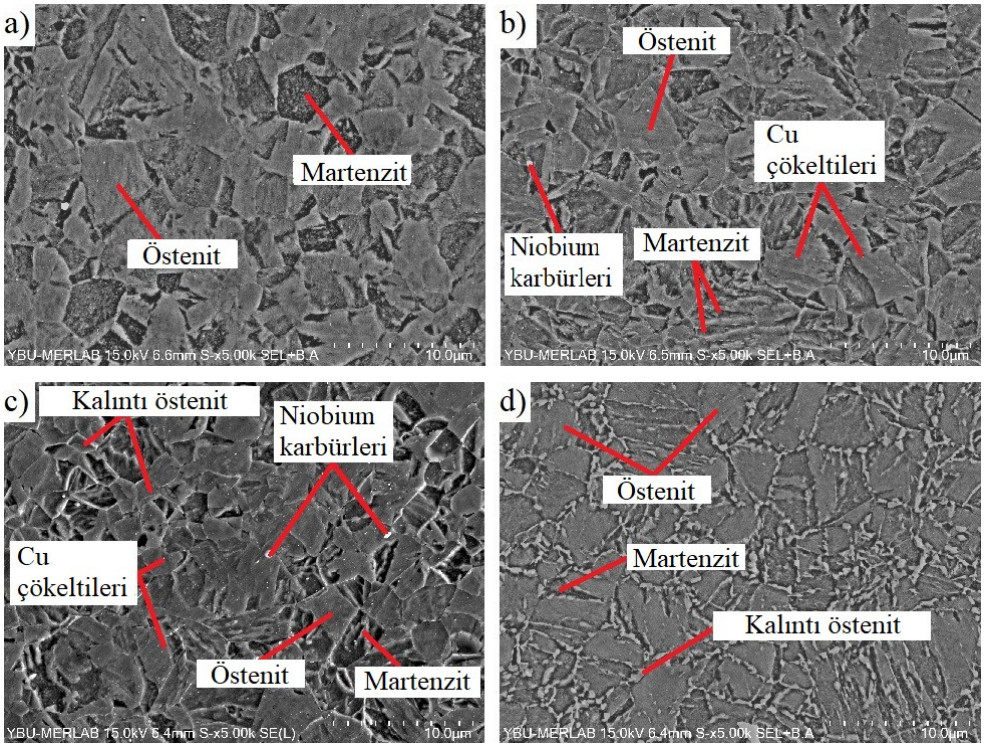
Uç radyusu 6mm olan zımba ile şekillendirilen numuneler 30º şekillendirme açısından sonra çok yüksek geri esneme değerleri sergilemiştir. Bu parametredeki en düşük ve en yüksek geri esneme değerleri sırasıyla 30º şekillendirme açısında H1150 kondisyonunda 3,425º ve

75º şekillendirme açısında H900 kondisyonunda 10,708º'dir.

Ütüleme süresinin 10 sn'ye arttırılması geri esneme değerlerinde yaklaşık %2 - %10 aralığında bir azalmaya sebep olmuştur. Ancak ütüleme süresinde ki artıştan bağımsız olarak zımba uç radyusundaki artışın tüm kondisyonlarda geri esneme miktarını arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca büküm açısındaki artışla geri esneme değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Mekanik değerleri en yüksek olan H900 kondisyonu, tüm şekillendirme parametrelerde en yüksek geri esneme değerlerini göstermiştir. UTS değeri en düşük ve sünekliği en fazla olan H1150, en düşük geri esneme değerlerine sahip kondisyondur. Con A ve H1025 kondisyonları birbirlerine yakın geri esneme değerleri göstermiştir. Bunlara ek olarak, her iki ütüleme süresinde de 15º büküm açısında tüm parametrelerde benzer geri esneme değerleri elde edilmiştir.

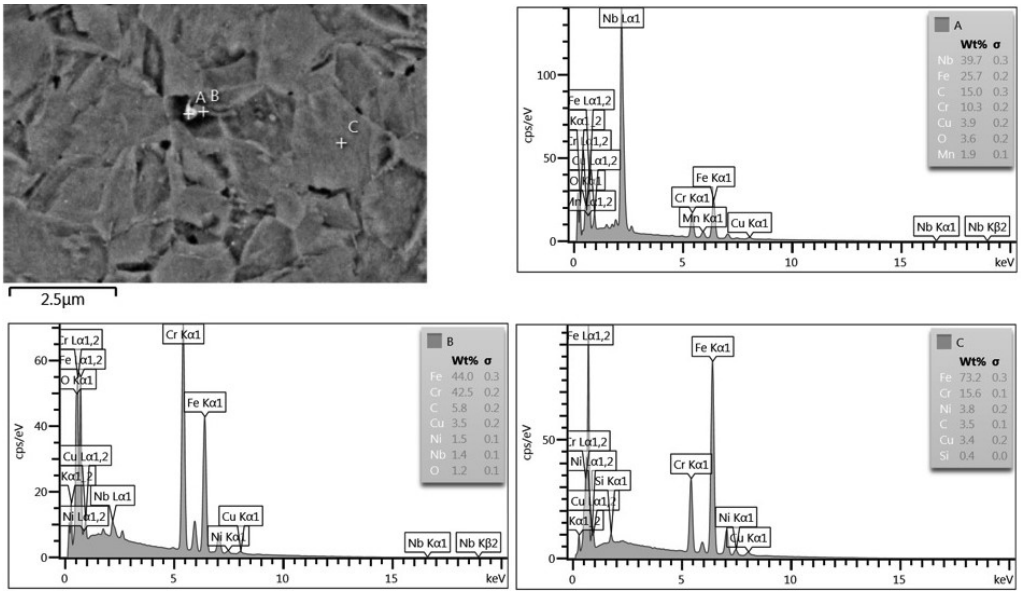
5.3. Alaşım Mikroyapısının İncelenmesi

15-5 PH alaşımının yaşlandırma ısıl işlemi değişkenlerine (ısıtılan sıcaklık, soğutma ortamı ve süre) bağlı olarak mikroyapısındaki değişimler incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında gerçekleştirilen yaşlandırma ısıl işlemi sonucunda, alaşımın mikroyapısında çökelme sertleşmesi mekanizması gerçekleşmiş ve parametrelerdeki değişkenlere göre farklı mekanik özellikler kazandığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.3. 15-5 PH alaşımının mikroyapı görüntüleri a) Con A b) H900 c) H1025 d) H1150

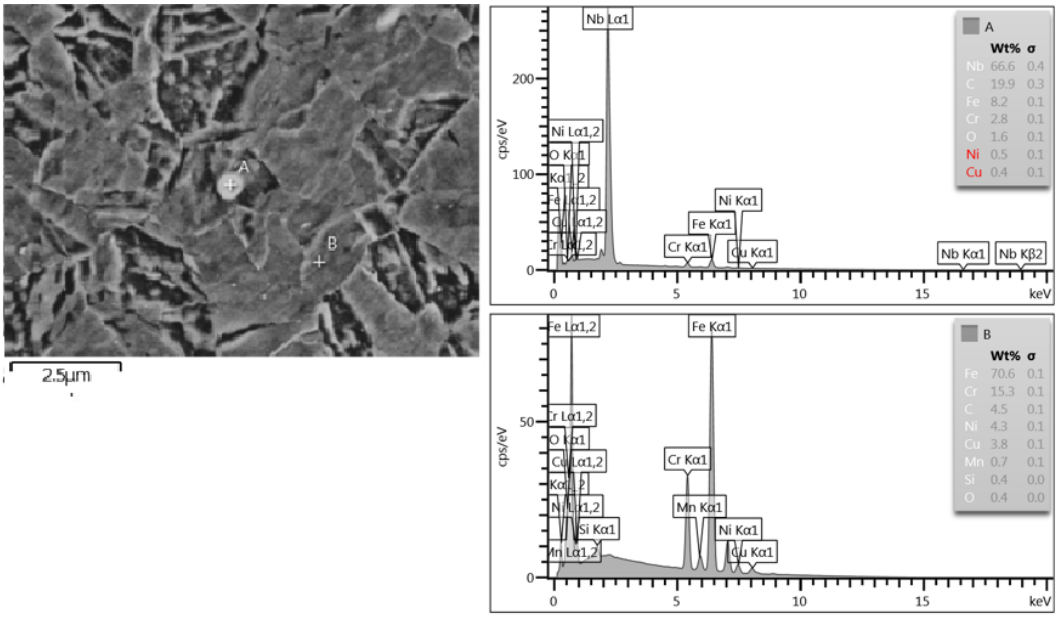
482 ºC sıcaklıkta 60 dk yaşlandırma işlemi ile elde edilen H900 kondisyonunda, tane sınırlarında dislokasyonları engelleyen Cu çökeltilerinin çekirdeklenmesi ve karbürlerin çözünmesine bağlı olarak artan tane boyutu meydana gelmektedir. Bu parçacık boyutları, dislokasyon hareketini engellemede etkili olmakta ve yarı uyumlu bir arayüz sağlayarak alaşımı sertleştirmektedir. Bu kondisyonda alaşım, karışık bir martenzit ile rastgele östenit oluşumuna sahip dinamik olarak eş eksenli taneler içermektedir. Bu yapı δ-ferrit matrisinin çözünmesinden kaynaklanmaktadır (Şekil 5.3b). Bu kondisyonda mikroyapının farklı noktalarından alınan XRD sonuçları Şekil 5.4 ile gösterilmiştir [9, 71].



Şekil 5.4. H900 kondisyonuna ait farklı noktalarından alınan XRD sonuçları

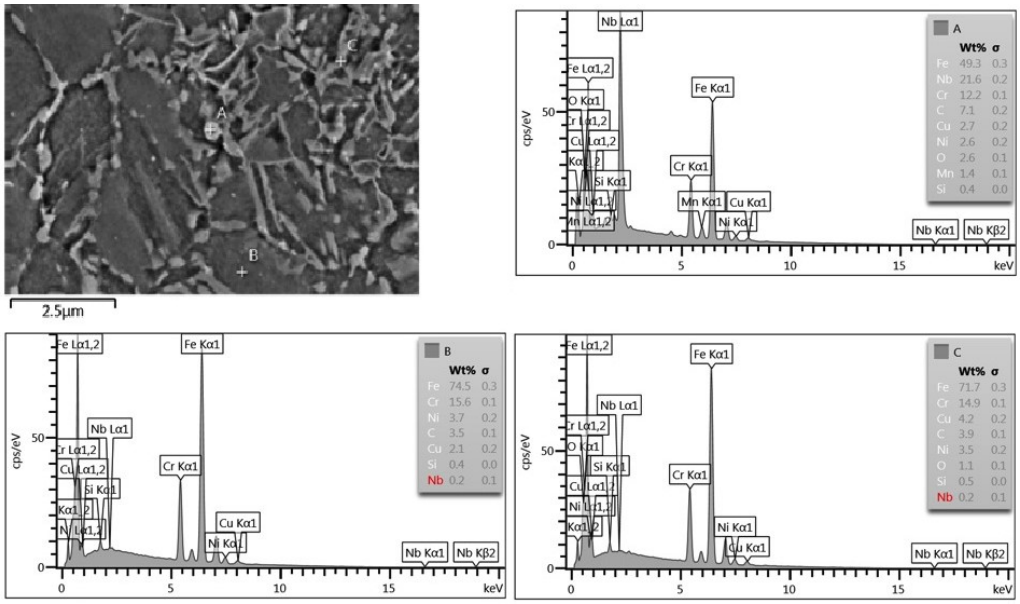
Genel olarak alaşımın mikroyapısında bulunan östenitin hacim fraksiyonu, 550 °C sıcaklığa kadar sabit değerini korumakta; ancak bu sıcaklığın üzerinde, artan sıcaklıkla birlikte hacim fraksiyonu artmakta ve 650 ºC sıcaklıkta maksimum değere ulaşmaktadır. 550 ºC sıcaklığın üzerindeki hacim fraksiyonundaki keskin artış, martenzitten östenite ters dönüşümden kaynaklanmaktadır [72].

Sıcaklığın ve uygulama süresinin artmasıyla aşırı yaşlandırma prosesi sonucunda çökelen parçacıkların boyutlarında artış ve tanelerde kabalaşma olmaktadır. 552 ºC sıcaklıkta 240 dk aşırı yaşlandırma işlemi sonucunda elde edilen H1025 kondisyonu, yüksek mukavemet ve stres korozyon çatlağına karşı yüksek direnç nedeniyle uçak yapısal parçalarında yaygın olarak kullanılan bir kondisyondur. H1025 ısıl işlemi mikroyapıyı tam olarak homojenleştiremez ve H900 işlemine kıyasla daha yüksek sünekliğe yol açan kaba ve seyrek dağılmış çökeltilere sahiptir. Aşırı yaşlandırma sonrasında bu sıcaklıkta martenzitin östenite ters dönüşümü meydana gelmekte, dislokasyon yoğunlukları azalmakta ve bu durum mukavemet değerlerinde düşmesine sebep olmaktadır (Şekil 5.3c). Bu kondisyonda mikroyapının farklı noktalarından alınan XRD sonuçları Şekil 5.5 ile gösterilmiştir [73-76].



Şekil 5.5. H1025 kondisyonuna ait farklı noktalarından alınan XRD sonuçları

621 ºC sıcaklıkta, östenitin hacim fraksiyonu, martenzitten östenite ters dönüşüm nedeniyle artmakta ve daha sonra soğuma sırasında ters östenitin martenzite dönüşümü nedeniyle azalmaktadır. 621 ºC'de 240 dk aşırı yaşlandırma işlemden sonra sertlikte belirgin bir azalma, martenzitin aşırı yaşlanması ve östenit oluşumundan kaynaklanmaktadır. Bu sıcaklıkta uzun süreli aşırı yaşlanmadan sonra bakır, martenzit çıtalarının tane sınırlarına difüze olmaktadır. Akma mukavemeti pahasına süneklikteki artışın sebebi dislokasyon yoğunluğunun düşmesi ve martenzitin östenite ters dönüşümü olarak açıklanmaktadır (Şekil 5.3d). Bu kondisyonda mikroyapının farklı noktalarından alınan XRD sonuçları Şekil 5.6 ile gösterilmiştir. [77-79].



Şekil 5.6. H1150 kondisyonuna ait farklı noktalarından alınan XRD sonuçları

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, farklı sıcaklıklar (482, 552 ve 621 °C) ve sürelerde (60 dk. ve 240 dk.) yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmış 15-5 PH paslanmaz çelik sac malzemelerin çeşitli kondisyonlarının V bükme ile şekillendirilebilirlikleri ve şekillendirme sonucunda oluşan geri esneme miktarları deneysel olarak araştırılmıştır. Gerçekleştirilen deneylerde, yaşlandırma ısıl işlemi sıcaklığı ve bu sıcaklıklarda bekletilme süresi, bükme kalıbı açısı, zımba uç radyusu ve ütüleme süresi deney değişkenleri olarak belirlenmiştir. Deneyler bilgisayar aracılığı ile parametrelerin belirlendiği ve çıktıların bilgisayar ortamında okunabildiği bir deney cihazında gerçekleştirilmiştir. V büküm ile şekil verilen numunelerin son açıları CMM ile ölçülmüş, ölçülen açılar kalıp açısından çıkarılarak esneme değerleri bulunmuştur. Bu çalışma sonucu elde edilen çıktılar aşağıda belirtilmiştir.

1) Çökelme ile sertleştirilebilen bir alaşım olan 15-5 PH alaşımının, sıcaklığa reaksiyon verdiği gözlemlenmiştir. Uygulanan sıcaklıkların arttırılmasına bağlı olarak, mikroyapıda değişim ve faz dönüşümleri sebebiyle mekanik özelliklerde önce artış ardından azalma gözlemlenirken bunlara bağlı olarak da geri esneme değerlerinde de belirgin değişimler gözlemlenmiştir.
2) Yaşlandırma ısıl işlemi parametrelerinde sıcaklığın ve ısıya maruz kalma süresinin artmasıyla akma mukavemeti değerinde oluşan değişkenliklere rağmen malzemenin sünekliğinde %12,5 gibi malzeme standartlarına göre daha yüksek değerler gözlemlenmiştir. Bu durum, dislokasyon yoğunluğunun düşmesi ve martenzitin östenite ters dönüşümünden kaynaklanmaktadır.
3) 482 ºC sıcaklıkta 60 dk bekletilen H900 kondisyonun UTS değeri alaşımın ilk haline oranla yaklaşık %35 artış ile 1489 MPa değerine ulaşmıştır. Ancak, bu ısıl işlem parametresinin sünekliği azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, H900 kondisyonunda, Cu çökeltilerinin çekirdeklenmesi ve karbürlerin tane sınırlarında çözünmesine bağlı olarak dislokasyon hareketleri engellenmekte ve bu durum alaşımda sertleştirmeye neden olmaktadır.
4) 552 ºC ve 240 dk. aşırı yaşlandırma işlemine tabi tutulan H1025 kondisyonunda UTS değeri 1183 MPa ölçülmüştür. Ayrıca bu kondisyon %6,7 ile en az uzama değeri gösteren kondisyondur.

5) 621 ºC ve 240 dk. aşırı yaşlandırma sonucunda elde edilen H1150 kondisyonu en düşük UTS değerine ve en yüksek gerinim değerine sahip kondisyondur. H1150 kondisyonuna ait UTS ve gerinim oranları sırasıyla 1005 MPa ve %12,5'tir.
6) 15-5 PH alaşımı, tüm deney parametrelerinde herhangi bir şekillendirme kusuru olmaksızın şekillendirilmiştir.
7) Ütüleme süresinin 0'dan 10 saniyeye arttırılması geri esneme değerlerini yaklaşık %2 ila %10 arasında azaltmıştır.
8) Zımba uç radyusundaki ve büküm açısındaki artışın tüm kondisyonlarda geri esneme miktarını arttırdığı tespit edilmiştir.
9) 0 sn. ütüleme süresinde en yüksek geri esneme değeri H900 kondisyonunda R 6 mm uç radyusunda ve 75° büküm açısında 10,948° olarak ölçülmüştür. Bu değer, 10 sn. ütüleme süresinde 10,708° olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte UTS değeri en düşük ve sünekliği en fazla olan H1150, en düşük geri esneme değerlerine sahip kondisyondur.
10) Tüm kondisyonlarda, 2 mm zımba uç radyusu için optimum büküm açısı 45º, 4 ve 6 mm uç radyusları için ise 30º'dir.

KAYNAKLAR

1. Gökmeşe, H. ve Özdemir, M. (2016). Hardox-500 sac malzemenin şekillendirilebilirlik davranişi üzerinde farkli sicakliklarin etkisi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 4 (4), 343-349.

2. Duman, E. ve Kaynak, Y. (2017). 15-5 PH Çelik Malzemesinin Kriyojenik Talaşlı İmalat Sürecinde Yüzey Bütünlüğü Analizi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 15 (1), 19-26.

3. Karaağaç, İ. ve Uluer, O. (2017). V bükme prosesinde geri esnemeye etki eden proses parametrelerinin deneysel araştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23 (8), 990-993.

4. Herny, E. (2009). Mechanical characterisation and investigation of thermal and thermomechanical aging mechanisms of martensitic stainless steel 15-5PH. *International Heat Treatment and Surface Engineering*, 3 (1-2), 65-69.

5. Zhou, T., Neding, B., Lin, S., Tseng, J.-C., and Hedström, P. (2021). Cu precipitation-mediated formation of reverted austenite during ageing of a 15–5 PH stainless steel. *Scripta Materialia*, 202, 114007.

6. Te, R.and Zhang, Y. (2021). Strength-Toughness Improvement of 15-5PH Stainless Steel by Double Aging Treatment. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 1-10.

7. Aldhabib, F., Sun, X. D., Alsumait, A., Alzubi, F., Ashe, E., Shen, K. R., Lu, D. Y., Cheng, A., Tovalin, K., and Del Campo, M. (2019). Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of 15-5 pH stainless steel for fastener applications. *Diffusion Foundations*, 22, 118-139.

8. Anil Kumar, V., Karthikeyan, M., Gupta, R. K., Gino Prakash, F., and Ram Kumar, P. (2012). Aging behavior in 15-5 PH precipitation hardening martensitic stainless steel. *Materials Science Forum*, 710, 483-488.

9. Palanisamy, D., Senthil, P., and Senthilkumar, V. (2016). The effect of aging on machinability of 15Cr-5Ni precipitation hardened stainless steel. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16, 53-63.

10. Peng, X.-Y., Zhou, X.-L., Hua, X.-Z., Wei, Z.-W., and Liu, H.-Y. (2015). Effect of aging on hardening behavior of 15-5 PH stainless steel. *Journal of Iron and Steel Research International*, 22 (7), 607-614.

11. Aghaie-Khafri, M.and Adhami, F. (2010). Hot deformation of 15-5 PH stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 527 (4-5), 1052-1057.

12. Bajguirani, H. H. (2002). The effect of ageing upon the microstructure and mechanical properties of type 15-5 PH stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 338 (1-2), 142-159.

13. Kumar, A., Balaji, Y., Prasad, N. E., Gouda, G., and Tamilmani, K. (2013). Indigenous development and airworthiness certification of 15–5 PH precipitation hardenable stainless steel for aircraft applications. *Sadhana*, 38 (1), 3-23.

14. Leu, D.-K. (2019). Relationship between mechanical properties and geometric parameters to limitation condition of springback based on springback–radius concept in V-die bending process. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 101 (1-4), 913-926.

15. Asnafi, N. (2000). Springback and fracture in v-die air bending of thick stainless steel sheets. *Materials & design*, 21 (3), 217-236.

16. Tekaslan, Ö., Gerger, N., ve Şeker, U. (2008). Determination of spring-back of stainless steel sheet metal in "V" bending dies. *Materials & design*, 29 (5), 1043-1050.

17. Özdemir, M., Gökmeşe, H., Dilipak, H., Yilmaz, V., ve Gürün, H. (2015). *Aşınmaya Dirençli Sac Malzemenin Şekillendirilebilirliğe Karşı Davranışı Ve Mikro Yapı Üzerindeki Etkisi.* 2. Uluslararası Demir Çelik Sempozyumu (IISS'15), Karabük, Türkiye.

18. Trzepieciński, T.and Lemu, H. G. (2020). Improving prediction of springback in sheet metal forming using multilayer perceptron-based genetic algorithm. *Materials*, 13 (14), 3129.

19. Umur, Y., Yigit, K., ve Bayram, A. (2020). Springback/Springforward Behaviour of DP Steels Used in the Automotive Industry. *Tehnički vjesnik*, 27 (1), 243-250.

20. Carden, W., Geng, L., Matlock, D., and Wagoner, R. (2002). Measurement of springback. *International Journal of Mechanical Sciences*, 44 (1), 79-101.

21. Garcia-Romeu, M., Ciurana, J., and Ferrer, I. (2007). Springback determination of sheet metals in an air bending process based on an experimental work. *Journal of Materials Processing Technology*, 191 (1-3), 174-177.

22. Buang, M. S., Abdullah, S. A., and Saedon, J. (2015). Effect of die and punch radius on springback of stainless steel sheet metal in the air V-die bending process. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 8 1322-1331.

23. Fathi, H., Semnani, H. M., Emadoddin, E., and Sadeghi, B. M. (2017). Effect of martensitic transformation on springback behavior of 304L austenitic stainless steel. *Materials Research Express*, 4 (9), 096510.

24. Thipprakmas, S.and Phanitwong, W. (2011). Process parameter design of spring-back and spring-go in V-bending process using Taguchi technique. *Materials & Design*, 32 (8-9), 4430-4436.

25. Ramadass, R., Sambasivam, S., and Thangavelu, K. (2019). Selection of optimal parameters in V-bending of Ti-Grade 2 sheet to minimize springback. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41 1-11.

26. Tekaslan, Ö., Gerger, N., ve Şeker, U. (2008). V bükme kalıplarında bakır sac malzemelerin geri esneme miktarlarının tespiti. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi,* 23 (1), 231-238.

27. Özdemir, M., Gökmeşe, H., Dilipak, H., ve Yilmaz, V. (2015). Aşınmaya Karşı Dirençli Sac Malzemenin Mikro Yapısal Karakterizasyonu Ve Şekillendirilebilirliğinin İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 3 (1), 385-393.

28. Basmaci, G. ve Sayin, L. (2019). Bakır sac levhaların "V" bükme yöntemi ile şekillendirilmesiyle oluşan geri esneme miktarının deneysel olarak incelenmesi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 11 (3), 147-154.

29. Aydin, K. ve Karaağaç, İ. (2019). DP600 ve HSLA300 sac malzemelerde geri esneme davranışlarına proses parametrelerinin etkisinin deneysel araştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7 (3), 1456-1465.

30. Şen, M., Yıldırım, E., Çebi, H., ve Özdemir, C. (2015). Çift fazlı çeliklerden üretilen otomotiv sac parçalarının dizaynında geri esnemeyi optimize edebilmek için sac kalınlığına bağlı olarak büküm radyüslerinin belirlenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 12 (2), 75-95.

31. Karaağaç, İ. ve Tahsin, Ö. (2017). Titanyum Grade 1 sac malzemede geri esnemenin deneysel araştırılması ve bulanık mantık ile tahmini. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 5 (3), 213-222.

32. Malyer, E. ve Kayral, S. A. (2018). Isıl işlemin AA6061 alüminyum alaşımı sac metal malzemenin şekillendirilmesine etkilerinin incelenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 9 (2), 741-751.

33. Özden, A. ve Demir, B.(2019). *Farkli Sac Gruplarının Şekillendirilmesinde Geri Yaylanma Ve Deformasyonun Mikro yapısal incelenmesi.* UDCS'19 Fourth International Iron and Steel Symposium, Karabük, Türkiye

34. Liu, Z., Li, L., Wang, G., Chen, J., and Yi, J. (2020). Springback behaviors of extruded 6063 aluminum profile in subsequent multi-stage manufacturing processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 109, 1-13.

35. Furrer, D.and Semiatin, S. (2010). ASM Handbook W. *Properties and selection: irons, steels and high performance alloys*, 1, 757-779.

36. Groover, M. P. (2020). *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems.* Oklahoma City, John Wiley & Sons.

37. Cashell, K.and Baddoo, N. (2014). Ferritic stainless steels in structural applications. *Thin-Walled Structures*, 83, 169-181.

38. Davis, J. R., (1998). *Metals Handbook Desk Edition*. Ohio, ASM International: Materials Park.

39. Campbell Jr, F. C. (2011). *Manufacturing technology for aerospace structural materials*.Amsterdam: Elsevier.

40. Ni, X., Chen, G., Wang, X., and Hui, X. (2001). MEAM simulation of distribution of Nb atoms in TiAl plus Nb system. *Journal of materials science & technology*, 17, 1-7.

41. Mcguire, M. F. (2008). *Stainless steels for design engineers*. Ohio:Asm International.

42. Baygut, A., Başdemir, V., ve Culha, O (2018). Soğuk Dövme Prosesi ile 20MnB4 Hammadde Kullanılarak Üretilen Cıvatanın Isıl İşlem Şartlarının Metalografik ve Mekanik Özelliklere Olan Etkisinin İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6 (4), 837-845.

43. Ferguson, B. L., Li, Z., and Freborg, A. (2005). Modeling heat treatment of steel parts. *Computational Materials Science*, 34 (3), 274-281.

44. Smirnova Zhanna, V., Vaganova, O., Kutepova, L., Kuttepov, M., and Chaykina Zh, V. (2020). Steel Heat Treatment Technology. *International Journal*, 8 (5), 1790 - 1793

45. Araoyinbo, A. O. (2023). Low temperature heat treatment of steel and the effect of quenching on the strength and oxidation behaviour. *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, 42 (1), 32-41.

46. Liscic, B., Tensi, H. M., Canale, L. C., and Totten, G. E.(2010). *Quenching theory and technology*. Florida: CRC Press.

47. Molinari, A., Pellizzari, M., Gialanella, S., Straffelini, G., and Stiasny, K. (2001). Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of tool steels. *Journal of materials processing technology*, 118 (1-3), 350-355.

48. Liscic, B. (1997). Chapter 8: Steel heat treatment. *Steel Heat Treatment Handbook*, 527-662.

49. Design, L. E. O. S. C. (2007). Handbook. *Concrete Reinforced Steel Institute*, 97–123.

50. Kasten, R. (1980). *A primer of terminology for heat treat customers.* New York, Taylor & Francis. 38, 32-39.

51. Naylor, D. J.and Cook, W. T. (1992). Heat treated engineering steels. *Materials Science and T*echnology, 7, 405-538.

52. Min, S. H.and Ha, T. K. (2014). Tensile Behavior of Spheroidizing Heat Treated High Carbon Steel. International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering, 8 (2), 105-107.

53. Altuntaş, O. ve Güral, A. (2015). Yüksek Karbonlu Sinterlenmiş Çeliklerin Darbe Tokluklarına Küreselleştirme Isıl İşlemlerinin Etkisinin İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 18 (3), 107-112.

54. Baday, Ş., Başak, H., ve Güral, A. (2015). Küreselleştirme Isıl İşlemleri Uygulanmış Orta Karbonlu Çeliğin Mikroyapı ve Sertlik Değerlerinin İncelenmesi. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 5 (1), 66-77.

55. Motorcu, A. (2010). Isil işlemsiz ve küreselleştirilmiş Ç52100 rulman çeliğinin farkli takimlarla işlenmesinde takim ömrü ve aşinmasinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25 (1), 65-75.

56. Gönenli, C. ve Oğuzhan, D. (2023). Genlik Değişiminin Titreşimli Gerilim Giderme Verim Oranı Üzerindeki Etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38 (1), 1-12.

57. Ongun, A., Uzun, İ., ve Turgut, O. K. (2017). Elektrik ark ve gazaltı kaynağı (MIG) ile birleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin mekanik özelliklerine, çeşitli ısıl işlemlerin etkisinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23 (1), 1-5.

58. Olabi, A.and Hashmi, M. (1996). Stress relief procedures for low carbon steel (1020) welded components. *Journal of materials processing technology*, 56 (1-4), 552-562.

59. Hasirci, H. (2010). AISI D6 çeliğinin adhesif aşinma davranişina isil işlem şartlari ve kayma hizlarinin etkileri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25 (3), 587-592.

60. Panneer Selvi, S., Sakthivel, T., Parameswaran, P., and Laha, K. (2016). Effect of normalization heat treatment on creep and tensile properties of modified 9Cr–1Mo steel. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 69 261-269.

61. Köksal, N. S., Uzkut, M., ve Ünlü, B. S. (2004). Farkli karbon içerikli çeliklerin mekanik özelliklerinin isil işlemlerle değişimi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6 (2), 95-100.

62. Güler, H.and Özcan, R. A. (2014). Yüksek karbonlu çeliklere su verme işleminin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 19 (2), 77-83.

63. Tayanç, M. ve Zeytin, G. (2000). Yüksek hiz çeliklerinin iç yapi ve isil işlem özellikleri. *BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 2 (1), 103-122.

64. Güvenç, M. A., Gürel, E. G., Akdi, S., ve Birol, Y.(2014) *Otomotiv süspansiyon sistemlerinde kullanilan küresel mafsallarin dinamik yük altinda yorulmaya isil işlem tekniklerinin etkisi.* 15th International Materials Symposium. Denizli, Türkiye.

65. Nyyssönen, T., Isakov, M., Peura, P., and Kuokkala, V.-T. (2016). Iterative determination of the orientation relationship between austenite and martensite from a large amount of grain pair misorientations. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47, 2587-2590.

66. Sheng, Z., Bonvalet Rolland, M., Zhou, T., Odqvist, J., and Hedström, P. (2021). Langer–Schwartz–Kampmann–Wagner precipitation simulations: assessment of models and materials design application for Cu precipitation in PH stainless steels. *Journal of Materials Science*, 56, 2650-2671.

67. Günay, M., Meral, T., ve Korkmaz, M. E. (2018). AISI 420 Martenzitik paslanmaz çeliğin delinebilirliğinin sonlu elemanlar yöntemiyle analizi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4 (3), 223-229.

68. Liu, B. C., Palazotto, A. N., Nassiri, A., Vivek, A., and Daehn, G. S. (2019). Experimental and numerical investigation of interfacial microstructure in fully age-hardened 15-5 PH stainless steel during impact welding. *Journal of Materials Science*, 54 (13), 9824-9842.

69. Mirzadeh, H.and Najafizadeh, A. (2009). Aging kinetics of 17-4 PH stainless steel. *Materials chemistry and physics*, 116 (1), 119-124.

70. Karaağaç, İ. ve Özdemir, A. (2009). *Sıvı basıncı ile sac şekillendirme (sbş) yönteminin derin çekilebilirlik üzerine etkilerinin incelenmesi.* 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, Türkiye.

71. Alafaghani, A. A., Qattawi, A., Jaman, M. S., and Ablat, M. A. (2019). Microstructure and mechanical properties of direct metal laser–sintered 15-5PH steel with different solution annealing heat treatments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105 3499-3520.

72. Park, E. S., Yoo, D. K., Sung, J. H., Kang, C. Y., Lee, J. H., and Sung, J. H. (2004). Formation of reversed austenite during tempering of 14Cr− 7Ni− 0.3 Nb− 0.7 Mo− 0.03 C super martensitic stainless steel. *Metals and Materials International*, 10 (6), 521.

73. Worsdale, C. (2022). *Tribological Design Challenges of a Space Grade Lead Screw Mechanism*. AIAA SCITECH 2022 Forum.

74. Nezhadfar, P., Burford, E., Anderson-Wedge, K., Zhang, B., Shao, S., Daniewicz, S., and Shamsaei, N. (2019). Fatigue crack growth behavior of additively manufactured 17-4 PH stainless steel: Effects of build orientation and microstructure. *International Journal of Fatigue*, 123, 168-179.

75. Eskandari, H., Lashgari, H., Ye, L., Eizadjou, M., and Wang, H. (2022). Microstructural characterization and mechanical properties of additively manufactured 17–4PH stainless steel. *Materials Today Communications*, 30, 103075.

76. Muslim, T., Karagoz, T., Kurama, S., Sezer, P., Yazici, O. F., ve Ozkok, R. (2023). Laser metal deposition of 17–4 PH stainless steel: Geometrical, microstructural, and mechanical properties investigation for structural applications. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 41 69-79.

77. Hättestrand, M., Nilsson, J.-O., Stiller, K., Liu, P., and Andersson, M. (2004). Precipitation hardening in a 12% Cr–9% Ni–4% Mo–2% Cu stainless steel. *Acta Materialia*, 52 (4), 1023-1037.

78. Ziewiec, A., Zielińska-Lipiec, A., and Tasak, E. (2014). Microstructure of welded joints of X5CrNiCuNb16-4 (17-4 PH) martensitic stainlees steel after heat treatment. *Archives of metallurgy and materials*, 59 (3), 965-970.

79. Sarkar, S., Kumar, C. S., and Nath, A. K. (2019). Effects of heat treatment and build orientations on the fatigue life of selective laser melted 15-5 PH stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 755 235-245.



Gazili olmak ayrıcalıktır