
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN 17-4 PH MALZEMESİNDE ISIL İŞLEMİN MALZEME ÖZELLİKLERİNE VE ŞEKİLLENDİRMEYE ETKİLERİ

Uğur Sıtkı TÜRKYILMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2024

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.

Uğur Sıtkı TÜRKYILMAZ
27/12/2024

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN 17-4 PH MALZEMESİNDE ISIL İŞLEMİN MALZEME ÖZELLİKLERİNE VE ŞEKİLLENDİRMEYE ETKİLERİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Uğur Sıtkı TÜRKYILMAZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2024

ÖZET

Bu çalışmada, eklemeli imalat yöntemiyle üretilen 17-4 PH paslanmaz çeliğine uygulanan ısıl işlemin ve eklemeli imalat üretim proses parametrelerinin mekanik özelliklere ve V bükme ile deformasyon dayanımına olan etkileri deneysel incelenmiştir. Deney numuneleri üç farklı yapı oryantasyonunda (XY, YZ ve XZ eksenleri) SLM yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Deneysel çalışmalar her yapı oryantasyonu için bir ısıl işlemsiz (As-built) ve bir de kondisyon A (con A) ısıl işlem uygulanmış numunelerde gerçekleştirilmiştir. As-built ve ısıl işlemli numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme testleri ve sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalardan, XY düzleminde üretilen as-built numuneler 850 MPa akma ve 950 MPa çekme dayanımına sahipken, YZ düzleminde üretilen numuneler 1030 MPa çekme dayanımı ve XZ düzleminde üretilen numunelerde 958 MPa çekme, 1000 MPa akma dayanımı ölçülmüştür. Kondisyon A ısıl işlem uygulanmış deney numunelerinde ise XY düzleminde en düşük 1290 MPa akma, YZ düzleminde 1340 MPa akma dayanımı ve XZ düzleminde 1390 MPa akma dayanımı kaydedilmiştir. V bükme ile deformasyon testlerinde ise as-built numunelerde en küçük geri esneme değeri XY düzlemde 30° açısında, en büyük geri esneme değeri de YZ düzleminde 15° açısında gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu	:	91448
Anahtar Kelimeler	:	Eklemeli imalat, Seçici lazer ergitme (SLM), 17-4 ph, ısıl işlem, yapı yönelimi, V Bükme
Sayfa Adedi	:	99
Danışman	:	Prof. Dr. İbrahim KARAAĞAÇ

THE EFFECTS OF HEAT TREATMENT ON MATERIAL PROPERTIES AND FORMING IN 17-4 MATERIAL PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING METHOD

(M. Sc. Thesis)

Uğur Sıtkı TÜRKYILMAZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2024

ABSTRACT

In this study, the effects of heat treatment and additive manufacturing process parameters on the mechanical properties and deformation resistance (via V-bending) of 17-4 PH stainless steel produced by additive manufacturing were experimentally investigated. Test specimens were produced using the Selective Laser Melting (SLM) method in three different build orientations (XY, YZ, and XZ axes). Experimental studies were conducted on specimens in their as-built condition and those subjected to condition A (con A) heat treatment for each build orientation. To determine the mechanical properties of both as-built and heat-treated specimens, tensile tests and hardness measurements were carried out. From the experimental studies, the as-built specimens produced in the XY plane exhibited a yield strength of 850 MPa and a tensile strength of 950 MPa, while the specimens produced in the YZ plane showed a tensile strength of 1030 MPa, and those produced in the XZ plane had a tensile strength of 958 MPa and a yield strength of 1000 MPa. For the condition A heat-treated specimens, the lowest recorded yield strength was 1290 MPa in the XY plane, 1340 MPa in the YZ plane, and 1390 MPa in the XZ plane. In the deformation tests using V-bending, the smallest springback value in the as-built specimens was observed at a 30° angle in the XY plane, while the largest springback value was found at a 15° angle in the YZ plane.

Science Code : 91448
Key Words : Additive manufacturing, selective laser melting SLM), 17-4 PH, heat treatment, building orientation, mechanical properties, V bending
Page Number : 99
Supervisor : Prof. Dr. İbrahim KARAAĞAÇ

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında emeği geçen ve bana destek olan herkese içten teşekkürlerimi sunmak isterim.

Öncelikle gerek akademik rehberliği gerekse teşvik edici sözleriyle beni yönlendiren tez danışmanım Sayın Prof. Dr. İbrahim KARAAĞAÇ'a teşekkür ederim. Tezimin her aşamasında gösterdiği sabır ve katkılarından dolayı minnettarım.

Çalışmalarım boyunca bana her türlü imkânı ve desteği sağlayan FNSS Savunma Sistemleri A.Ş.'ye de teşekkürlerimi iletmek isterim. Şirketin sağladığı olanaklar bu araştırmanın başarılı bir şekilde tamamlanmasına büyük katkı sağladı.

Teknik konularda bana verdiği destek ve yardımları için Dr. Barış ÇETİN'e teşekkür ediyorum. Uzmanlığı ve sorunlara pratik çözümler oluşturma yeteneği bana büyük ölçüde yardımcı oldu.

Ayrıca, her koşulda yanımda olan ve bana güç veren değerli yöneticim Kerem KAPLAN'a ve Dr. İbrahim TÜRKMEN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Onların varlığı, bu süreci benim için çok daha katlanılır hale getirdi.

Son olarak, bu yolda beni yalnız bırakmayan, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen tüm aileme, dostlarıma ve Sena BOZKURT'a teşekkür ederim. Hepiniz bu çalışmanın bir parçası oldunuz ve bana ilham verdiniz.

Teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xii

SİMGELER VE KISALTMALAR xviii

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 5

2.1. 17-4 PH Malzemesinin Eklemeli İmalat ile Üretimi, Isıl İşlem ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi 5

2.2. Paslanmaz Çeliklere Uygulanan Isıl İşlemler 33

2.3. Paslanmaz Çeliklerin Şekillendirilebilirliği 53

2.4. Sac Malzemelere Uygulanan V-Bükme İşlemi 59

3. MATERYAL VE METOT 65

3.1. Deney Malzemelerinin SLM Yöntemi ile Üretimi 65

3.2. Deney Numunelerinin Karakterizayonu 69

3.2.1. Çekme testi 69

3.2.2. Sertlik ölçüm testi 70

3.3. Deney Malzemesinin Isıl İşlemi 71

3.4. Deney Malzemelerinin Mikroyapı İncelemesi 72

3.5. Geri Esneme Ölçümü 76

4. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI 79

4.1. Yapı Oryantasyonuna Göre Mekanik Test Sonuçları 79

4.2. Deformasyon Dayanımın Sonuçları 82

Sayfa

4.3. Mikroyapı İnceleme Sonuçları..... 84

5. SONUÇ..... 89

KAYNAKLAR..... 91

ÖZGEÇMİŞ..... 99

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. 17-4 PH paslanmaz çelik test numunelerinin üretimi için SLM proses parametreleri 5

Çizelge 2.2. Vickers sertliği, çekme testi sonuçları ve pekleştirme 8

Çizelge 2.3. İnce, orta ve kaba boyutlu tozların kimyasal bileşeni 9

Çizelge 2.4. Mekanik özellik tablosu 9

Çizelge 2.5. 17-4 PH paslanmaz çelik su ve gaz atomize tozların parçacık özellikleri . 11

Çizelge 2.6. Bu çalışmada kullanılan L-PBF işleme koşulları 11

Çizelge 2.7. Örneklerin üretimi için kullanılan ve farklı LED = P/(v.h.d) değerlerine yol açan proses parametreleri 11

Çizelge 2.8. Çekme ve yorulma test numuneleri için işlem geçmişinin tedarikçiye özgü özeti 13

Çizelge 2.9. Tüm tedarikçiler ve JHU/APL için ortalama gerilme özelliği değerleri 13

Çizelge 2.10. Test numunelerinin maksimum çekme dayanımı ölçümleri 14

Çizelge 2.11. Test numunelerinin mekanik özellik ölçümleri 15

Çizelge 2.12. Temel SLM parametreleri için deney tasarımı 16

Çizelge 2.13. Deneysel plan ve planın tepkisi 16

Çizelge 2.14. Isıl işlem sonrası sertlik değerleri 17

Çizelge 2.15. EOS M 290 ve Renishaw Eİ 400 yazıcıda kullanılan SLM işlem parametreleri 20

Çizelge 2.16. Çekme testlerinin sonuçları 21

Çizelge 2.17. Biriktirilmiş, biriktirilmiş + ısıl işlem görmüş ve dövülmüş numunelerin çekme verileri 22

Çizelge 2.18. Nihai ve işlenmiş numuneler için dikkate alınan ısıl işlem prosedürleri .. 25

Çizelge 2.19. Yüksek sıcaklıklarda 17-4 PH paslanmaz çeliğin geçiş gerilimi ve akma dayanımının karşılaştırılması 26

Çizelge 2.20. SLM ile işlenen PH paslanmaz çelik gerilme özellikleri 26

Çizelge 2.21. Yöntem 1 ve 2'de kullanılan 17-4 tozlarının ağırlık yüzdesi cinsinden bileşimleri 27

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.22. Yöntem 1 ve 2 için kullanılan bazı temel baskı parametreleri 27

Çizelge 2.23. Yöntem 1 ve 2 için kullanılan bazı temel termomekanik parametreler 28

Çizelge 2.24. Yapı plakasından 90°, 45° ve 0° uzaklıkta inşa edilen yöntem 1 çekme kuponları için mekanik özellikler 28

Çizelge 2.25. Üç farklı yapıda, yapı plakasının 90° dışına inşa edilen yöntem 2 çekme kuponları için mekanik özellikler 28

Çizelge 2.26. Isıl işlem koşulları..... 29

Çizelge 2.27. Çözelti işleminin uygulanıp uygulanmamasına göre mekanik özellik 29

Çizelge 2.28. Mekanik özelliklerin yaşlandırma ısıl işlem koşullarına göre değişimi ... 29

Çizelge 2.29. SLM 17-4 PH birincil ürün aşaması 30

Çizelge 2.30. Eİ 17-4 PH paslanmaz çeliğin yorulma sonuçları 31

Çizelge 2.31. Üretilen malzemelerin mekanik test sonuçları 32

Çizelge 2.32. Isıl işlem sıcaklığı ve nitrik asit konsantrasyonunun HA tabakasının kristallenmesi üzerindeki etkisi 34

Çizelge 2.33. SLM sürecine dayalı maraging çeliğinin ısıl işlem şeması 38

Çizelge 2.34. Isıl işlem koşulları..... 39

Çizelge 2.35. 316L çekme ve Charpy numunelerine uygulanan ısıl işlemler..... 40

Çizelge 2.36. DIN 1.4057 paslanmaz çeliğin sertliği (HB), Nihai kopma dayanımı (**σ**r) ve darbe enerjisi 42

Çizelge 2.37. Farklı yaşlandırma koşullarında malzemenin oda sıcaklığındaki darbe tokluğu 44

Çizelge 2.38. Ön kırılma sonra ölçülen kırık uzunluğu 45

Çizelge 2.39. 15-5 PH çeliğinin çeşitli yaşlandırma işlemlerinden sonra karşılık gelen mekanik özellikleri 46

Çizelge 2.40. Numunelerin ısıl işlem detayları..... 47

Çizelge 2.41. Numunelere ait mekanik özellikler..... 48

Çizelge 2.42. Özet mekanik özellikler 48

Çizelge 2.43. 17-4 PH paslanmaz çeliklerin farklı yaşlandırma koşullarında oda sıcaklığı mekanik özellikleri..... 52

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.44. Ultra ince ferritik paslanmaz çeliğin çekme özellikleri 55

Çizelge 2.45. Folyolar için ortalama tane boyutları ve T/D oranları 56

Çizelge 2.46. 304L ve 304L-Cu'ya ait mekanik özellikler 58

Çizelge 2.47. Deneysel tasarım ve tepki değerleri..... 59

Çizelge 3.1. 17-4 PH malzemesine ait tozun kimyasal bileşimi..... 67

Çizelge 3.2. Deney numuneleri üretim parametreleri..... 68

Çizelge 3.3. Numunelere ait detay bilgi..... 78

Çizelge 4.1. As-built ve kondisyon A'ya ait sertlik ölçüm değerleri 82

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. SLM ile üretilen 17-4 PH SS'in farklı koşullardaki çekme özellikleri ve diğer araştırmalarla karşılaştırılması 6

Şekil 2.2. (a) SLM üretim sürecinin şeması, (b) 17-4 PH SS tozu ve SLM 17-4 PH SS numunelerinin SEM görüntüsü, (c) dikey ve (d) yatay olarak üretilmiş çekme çubukları 7

Şekil 2.3. SLM 17-4 PH'ın farklı yapı oryantasyonlarındaki gerilme-gerinme eğrisi .. 7

Şekil 2.4. SLM ile üretilmiş 17-4 PH'ın mikroyapı-özellik korelasyonunun şematik gösterimi 8

Şekil 2.5. SLM işlenmiş ve dövülen numuneler arasındaki gerilme özelliklerinin karşılaştırılması 10

Şekil 2.6. Düşük ve yüksek büyütmeli SEM mikrografları ile işlenmiş temsili numunelerin yanal yüzeyleri: (a) ve (d) Düşük LED, (b) ve (e) Orta LED, (c) ve (f) Yüksek LED 12

Şekil 2.7. LED'in bir fonksiyonu olarak SLM numunelerinin sertliği (HRC) 12

Şekil 2.8. Alt tabaka plakası üzerinde fabrikasyon halindeki numune..... 14

Şekil 2.9. İşlenmiş numuneler (ekseni yapı yönüne paralel (||) ve dik (⊥) olan: a) AlSi10Mg; b) Ti6Al4V; c) 17-4PH) üzerindeki çekme testlerinden değerlendirilen mühendislik gerilme-gerinme eğrilerinin karşılaştırılması .. 15

Şekil 2.10. 17-4 PH SLM numunelerinin akma dayanımı..... 16

Şekil 2.11. Değişen kütle için faz diyagramının izoplet kesiti (a) C ve (b) Nb fraksiyonları. Alaşımın bileşimini noktalı dikey çizgi gösterirken, yatay noktalı çizgiler çeşitli ısıl işlem sıcaklıkları gösterir..... 18

Şekil 2.12. Nihai ve ısıl işlem görmüş koşullarda SLM 17-4 PH mühendislik gerilme-gerinme eğrileri 19

Şekil 2.13. (a) %0,15 (Nf = 236.820) gibi düşük bir gerilme genliğinde dikey bir as-built numunesi için kırılma yüzeyinin genel görünümü ve (b) yorulma çatlaklarının yüzeye yakın erimemiş bir bölgeden başladığını gösteren çatlak başlangıç bölgesinin büyütülmüş görünümü 19

Şekil 2.14. (a) %0,3 gerinme genliğinde (Nf = 6.422) dikey bir as-built numunesi için kırılma yüzeyinin genel görünümü ve çatlak başlangıç bölgelerinin büyütülmüş görünümü (b) numune yüzeyinin altındaki boşluklar ve (c) yüzeye yakın erimemiş bir bölge..... 19

Şekil 2.15. Basılı numune ve önceden tanımlanmış yapı yönelimleri..... 20

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.16. İki farklı lazer tarama modelinin şematik gösterimi, a: tek yön b: zigzag ... 21

Şekil 2.17. Katmanların şematik katı dolgu ve duvar baskı deseni 22

Şekil 2.18. Yatay (Y) ve dikey (D) test numuneleri için çekme testi sonuçları..... 23

Şekil 2.19. SLM 17-4 PH çelik numunelerinin farklı yaşlandırma sonrası işlem koşulları altında mekanik özellikleri: (a, b) gerilme-gerinim eğrileri ve (c, d) temel gösterge istatistikleri. İlk sıra: 1 saat boyunca farklı yaşlandırma sıcaklıklarında mekanik özellikler, İkinci sıra: 482 C'de farklı yaşlandırma sürelerinde mekanik özellikler 24

Şekil 2.20. (a) ekstansometre çıkarma noktasına kadar mühendislik gerilimi-mühendislik gerinimi eğrisi ve (b) kırılmaya kadar mühendislik gerilimi-deplasman eğrisi 25

Şekil 2.21. Farklı ısıl işlem koşulları için N2 atmosferi altında SLM'de işlenen 17-4 PH paslanmaz çeliğin gerilme-gerinme eğrileri 27

Şekil 2.22. EBM (a) ve SLM (b) sistem şemaları. Atomize Cu tozu örneği; SEM görüntüsü (c)..... 30

Şekil 2.23. Eİ ve Gİ 17-4 PH paslanmaz çeliklerin üç boyutlu stereografik mikroyapısı 31

Şekil 2.24. 17-4 paslanmaz çeliğin XRD profilleri: (a) toz, (b) nihai, (c) geleneksel döküm malzeme, (d) bilyelenmiş yüzey, (e) bilyelenmiş numunenin enine kesiti 33

Şekil 2.25. DMLS ile üretilen 17-4 paslanmaz çeliğin mikrosertlik değerlerindeki değişim 33

Şekil 2.26. (a) Isıl işlemde kaplanmış numunelerin XRD grafiği 500 °C, HNO3 %10; (b) Isıl işlem 500 °C, HNO3 %20; (c) Isıl işlem 700 C, HNO3 %20 34

Şekil 2.27. Aşındırılmış numune yüzeylerinin SEM morfolojisi, (a) ve (d) nihai (b) ve (e) HT950, (c) ve (f) HT1100 35

Şekil 2.28. Çökeltme plakaları dijital (sol) ve gerçek (sağ) 36

Şekil 2.29. Öztemperleme ve martemperleme prosesi için akış şemaları 36

Şekil 2.30. (a) Isıl işlem görmüş dikey yapılı SLM ve dövme 15-5 PH için ortalama akma dayanımı, (b) kopma anındaki çekme gerilmesi 37

Şekil 2.31. Farklı ısıl işlemlerde maraging çeliğinin mikro-Vickers sertliği: (a) (b) ST; (c) (d) DAT ve SAT 38

Şekil 2.32. Alındığı gibi ve ısıl işlem görmüş koşullarda kırılmış yüzeyler 39

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.33. 316L paslanmaz çelik toz morfolojisi (a). Çekme (b) ve Charpy (c) testi için parça konumlandırma 40

Şekil 2.34. 316L'nin as-built ve ısıl işlem koşullarında (HT1, HT2, HT3) mekanik özellikleri ve EN 10216-5:2013 standardı ile karşılaştırılması 40

Şekil 2.35. 17-7 PH kaynaklarının mikroyapıları: (a) kaynaklanmış durumdaki mikroyapı, (b) kaynaklanmış durumdaki mikroyapı ve ardından 465 °C/1 saat yaşlandırma, (c) 760 °C/1 saat tavlama ve ardından 620 °C/1 saat yaşlandırma sonrası mikroyapı 41

Şekil 2.36. DIN 1.4057 paslanmaz çeliğin çift östenitleştirme diyagramı 41

Şekil 2.37. Artan temperleme sıcaklığı ile sertlikteki değişim 42

Şekil 2.38. Malzemenin farklı metalurjik koşullardaki optik mikrografları: (a) çözelti tavlaması, (b) 580 °C'de 0,25 saat yaşlandırma, (c) 580 °C'de 4 saat yaşlandırma 43

Şekil 2.39. Üç farklı koşulda malzeme için mühendislik gerilme-gerinim eğrisi, tavlanmış, 580 °C'de 0,25 ve 4 saat yaşlandırılmış 43

Şekil 2.40. 0° ve 45° yapı yönelimleri ile katman sınırları mavi ile gösterilmiştir 44

Şekil 2.41. Yaşlandırma süresinin çözelti ile muamele edilmiş numunelerin sertliği üzerindeki etkisi 47

Şekil 2.42. Çeşitli sıcaklıklarda yaşlandırma süresi ile (a) sertlik ve (b) östenit miktarındaki değişimler 49

Şekil 2.43. PH 13-8 Mo ve 17-4 PH paslanmaz çelik ile mevcut çeliğin çekme dayanımı ve absorbe edilen enerji arasındaki ilişki 49

Şekil 2.44. 1100 veya 1200 °C'de östenitlenmiş ve yağda söndürülmüş 17Cr-2Ni çelik numuneler için temperleme sıcaklığının fonksiyonu olarak oda sıcaklığı kırılma tokluğu 50

Şekil 2.45. (a) 470 °C (b) 510 °C ve (c) 600 °C'de 1 saat yaşlandırılmış alaşımın mikroyapısı 51

Şekil 2.46. 17-4 PH'ın 350 °C'de 15 ay yaşlandırıldıktan sonraki mikroyapısı (a) G-Fazının çökelmesi (oklu); (b) (a)'nın SADP'si; (c) NbC'nin çökelmesi (oklu) ve lath martensit matrisi 51

Şekil 2.47. 17-4 PH paslanmaz çeliklerin 400 °C'de test edilen üç koşuldaki monoton gerilme-gerinim eğrileri 52

Şekil 2.48. SLM ile üretilmiş 304L'nin AB ve farklı ısıl işlem koşulları altında mühendislik gerilme-gerinim eğrileri 53

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.49. (a) oda sıcaklığında (b) 150°C'de (c) 300°C'de 65mm işlenmemiş parça için teorik ve deneysel kalınlık dağılımı sonuçlarının karşılaştırılması 54

Şekil 2.50. Çekilmiş kapta simüle edilmiş von-mises gerilmeleri (a) oda sıcaklığında (b) 150°C'de (c) 65mm boş için 300°C'de..... 54

Şekil 2.51. (a) Marciniak testi ve (b) Nakazima testinden elde edilen kırılmış numuneler..... 55

Şekil 2.52. Nakazima testinde istenmeyen kırıklar 55

Şekil 2.53. (a) kubbe yüksekliği test düzeneği; (b) zımba ve pot tutucu; (c) bağlayıcı ve kalıp 56

Şekil 2.54. 950°C'de ısıl işlem altında (a)-(c) 150 µm (d)-(f) 50 µm kalınlıktaki kırılma görüntüleri..... 56

Şekil 2.55. Çekme testlerinden sonra numuneler: (a) 304 L ve (b) 304L-Cu..... 57

Şekil 2.56. Çekme testlerinden sonra numuneler: (a) 304 L ve (b) 304L-Cu..... 57

Şekil 2.57. Farklı çap ve sıcaklıklarda çekme numuneleri 58

Şekil 2.58. ISMF'e ait deneysel numune 59

Şekil 2.59. Yük altında bükme açısına göre geri esneme katsayısı 60

Şekil 2.60. Geri esneme tahmini a) bakır b) pirinç..... 61

Şekil 2.61. Farklı hızlardaki geri yaylanma değerleri a) 60°, b) 90° 61

Şekil 2.62. Geri esneme grafikleri ve elde edilen polinom eğri denklemleri 62

Şekil 2.63. 3mm kalınlığın S355JR sac levhanın kalıp açısına göre geri yaylanma grafiği 63

Şekil 2.64. 75° büküm açısında şekillendirilebilirlik-geri esneme ilişkisi 64

Şekil 3.1. Eklemeli imalat yönteminin aşamaları..... 65

Şekil 3.2. SLM işleme odasının ana bileşenlerle birlikte gösterimi 66

Şekil 3.3. SLM'nin temel proses parametreleri 66

Şekil 3.4. Eklemeli imalat deney numunelerinin üretimi..... 67

Şekil 3.5. Üretimi tamamlanmış deney numuneleri 68

Şekil 3.6. Çekme test numunesi a) Teknik resmi b) Üretimi tamamlanmış numune 68

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.7. Deney numuneleri a) XY çekme çubuğu, b) YZ çekme çubuğu, c) XZ çekme çubuğu, d) XZ dikdörtgen prizmatik, e) XY dikdörtgen prizmatik, f) YZ dikdörtgen prizmatik 69

Şekil 3.8. a) Çekme testi cihazı b) Deney numunesinin çekme testi 70

Şekil 3.9. Çekme test numunesinin sertlik ölçümü 71

Şekil 3.10. Deney numunelerinin ısıl işlem sürecinin grafiksel gösterimi 71

Şekil 3.11. a) Bakalit yapılmış numune b) Optik mikroskop..... 72

Şekil 3.12. XY düzlemi As-built numune için mikroskobik görüntüleri a) 4x b) 10x c)20x d)20x detay 73

Şekil 3.13. XY düzlemi kondisyon A numune için mikroskobik görüntüleri a) 4x b) 10x c) 20x 73

Şekil 3.14. XZ düzlemi As-built numune için mikroskobik görüntüleri a) 4x b) 10x c)20x d)20x detay 74

Şekil 3.15. XZ düzlemi kondisyon A numune için mikroskobik görüntüleri a) 4x b) 10x c) 20x 74

Şekil 3.16. YZ düzlemi As-built numune için mikroskobik görüntüleri a) 4x b) 10x c) 20x 75

Şekil 3.17. YZ düzlemi kondisyon A numune için mikroskobik görüntüleri a) 4x b) 10x c) 20x 75

Şekil 3.18. Geri esnemenin şematik gösterimi a) Geri esneme. b) Negatif geri esneme/ileri yaylanma 76

Şekil 3.19. Deneysel çalışma ortamı ve kalıp grubu görüntüsü..... 77

Şekil 3.20. CMM ile geri esneme açılarının ölçümü 77

Şekil 4.1. Yapı oryantasyonlarına göre as-built numunelerin çekme test sonuçları 79

Şekil 4.2. Yapı oryantasyonuna göre kondisyon A numunelerin çekme test sonuçları... 80

Şekil 4.3. Deney numunelerine ait uzama verileri a) As-built numuneler b) Kondisyon A ısıl işlemli numuneler 81

Şekil 4.4. a) 45° bükülmüş ısıl işlemli numune b) 60° bükülmüş As-built numune 83

Şekil 4.5. Optik görüntüleme a) As-built numune, b) Yaşlandırılmış numune, c) Optik görüntüleme alınan numuneler..... 83

Şekil 4.6. Yapı oryantasyonuna göre ısıl işlemli numunelerin bükme açısı ve ölçülen açı 84

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.7. Yapı oryantasyonuna göre as-built numunelerin bükme açısı ve ölçülen açı 84

Şekil 4.8. a) XY düzlemi as-built numune optik mikroskop görüntüsü (x10) b) XY düzlemi ısıl işlemli numune optik mikroskop görüntüsü (x10) 85

Şekil 4.9. a) XY düzlemi kalıntı östenit adacıklarında yönlenme (x4) b) XY düzlemi kalıntı östenit adacıklarında yönlenme (x4) 86

Şekil 4.10. a) XZ düzlemi porozite yapılar (x10) b) XY düzlemi porozite yapılar (x10) 87

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
°C	Santigrat Derece
µm	Mikrometre
dev/dak	Devir cinsinden hız
GPa	Gigapascal
K	Kelvin
mm	Milimetre
mm/s	Hız
MPa	Mega Pascal
W	Güç

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AB	As-built, İlk üretim
ANN	Yapay Sinir Ağı
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
CMM	Bilgisayar Destekli Koordinat Ölçüm Cihazı
CMT	Soğuk Metal Transfer
CNC	Bilgisayar Destekli Kontrol
CSR	Döngüsel Gerilim Tepkisi
DMLS	Doğrudan Metal Lazer Sinterleme
EBSD	Elektron Geri Saçılımlı Kırınım
Eİ	Eklemeli İmalat
EN	Elektrokimyasal Gürültü
FFF	Eritilmiş Filament Üretimi
FLD	Şekillendirme Sınır Diyagramı
Gİ	Geleneksel İmalat

Kısaltmalar	Açıklamalar
HA	Hidroksiapatit
HIP	İzostatik Basınç
HRC	Rockwell Sertlik
LED	Lazer Enerji Yoğunluğu
L-PBF	Lazer Toz Yatağı Füzyon
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SHT	Çözelti Isıl İşlemi
SLM	Seçici Lazer Ergitme
TEM	Transmisyon Elektron Mikroskobu
VHN	Vickers Sertlik
WAAM	Tel ve Ark Katmanlı İmalat
WEDM	Tel Erozyon
XRD	X-ışını Kırınımı

1. GİRİŞ

Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemi, eklemeli imalat teknolojileri arasında öne çıkan bir yöntem olup, metal tozlarının lazer ışını yardımıyla katman katman eritilerek birleştirilmesi prensibi ile çalışmaktadır. Bu yöntem, karmaşık geometrik şekillerin yüksek çözünürlükte üretiminde büyük avantaj sağlamaktadır. Farklı mühendislik uygulamalarında başarıyla kullanılan SLM, geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla daha az malzeme israfı, artırılmış tasarım esnekliği ve daha kısa üretim süreleri gibi avantajlar sunmaktadır. SLM'nin bu avantajları; özellikle havacılık, tıp, otomotiv ve savunma sanayi gibi yüksek performans gerektiren alanlarda geniş kabul görmesini sağlamaktadır.

Eklemeli imalatta kullanılan malzemelerin mikro yapısı, üretim parametreleri ve sonrasında uygulanan ısıl işlemler ile önemli ölçüde etkilenmektedir. Isıl işlem, malzemenin mikro yapısını ve mekanik özelliklerini değiştiren bir süreçtir. Eklemeli imalat ile üretilen parçaların kullanım yerlerine göre performansının optimize edilmesi için uygun ısıl işlem parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. 17-4 PH paslanmaz çeliği, yüksek mukavemet, sertlik, iyi korozyon direnci ve mükemmel mekanik özelliklerine sahip bir alaşımdır. 17-4 PH paslanmaz çelik, martensitik özellikleri ve ilave edilen bakır ile yaşlandırma işlemi sırasında çökelme sertleşmesine olanak tanımaktadır. Yüksek mekanik dayanım gerektiren uygulamalarda tercih edilen 17-4 PH, özellikle denizcilik, havacılık, kimya ve petrol endüstrisi gibi aşırı zor koşullarda çalışan parçalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. 17-4 PH paslanmaz çeliği, martensitik ve östenitik fazlar arasında dengesini sağlayan bir alaşımdır. Yapılan ısıl işlemler, bu fazlar arasındaki dönüşümleri kontrol etmeyi ve dolayısıyla malzemenin nihai mekanik özelliklerini optimize etmeyi sağlamaktadır. Bu çalışma kapsamında, SLM yöntemi ile üretilen 17-4 PH çeliğinin ilk üretim (as-built) haldeki mekanik özellikleri ile daha sonrasında uygulanan çeşitli ısıl işlemlerle mikro yapı değişimlerini ve deformasyon dayanımlarını incelemek amaçlanmıştır.

Bükme işlemi, özellikle metal malzemelerin esneklik ve elastikiyet özelliklerinin değerlendirilmesinde kullanılan yaygın bir deformasyon yöntemdir. Bükme testleri, malzemenin deformasyon davranışını ve geri esneme karakteristiğini anlamak için kritik öneme sahiptir. Geri esneme, malzemenin elastiklik sınırları içinde ne kadar orijinal formuna geri dönebildiğinin bir göstergesi olup özellikle yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda malzemenin performansını belirleyici bir faktördür.

SLM teknolojisinin sağlayacağı avantajları, özellikle parçanın kullanım yerine göre yüksek performans gerektiren uygulamalar, prosesin ve proses etki eden parametreleri daha iyi anlayarak geliştirme fırsatı sunması bu araştırmanın önemini ortaya koymaktadır. 17-4 PH çeliğinin SLM yöntemiyle üretilmesi, malzemenin karmaşık ve özelleşmiş geometrilerde kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen bulgular, daha etkin ve performans odaklı üretim süreçlerinin geliştirilmesine ve mevcut SLM uygulamalarının optimize edilmesine katkıda bulunacaktır. Ayrıca, endüstriyel uygulamalarda malzeme performansının artırılması ve üretim süreçlerinde verimliliğin artırılması açısından önemli katkılar sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasında, SLM yöntemi ile üretilen 17-4 PH çelik numunelerin hem as-built yapıda hem de çeşitli ısıl işlem koşulları altında Kondisyon A'ya dönüştürülen malzemenin mekanik ve mikro yapısal özelliklerindeki değişimleri incelemektedir. Araştırma kapsamında, ısıl işlem parametrelerinin etkileri, farklı üretim parametrelerinde üretilen numunelerin mikro yapı ve mekanik özelliklerinin karakterizasyonu ve V bükme testleri ile bükülme dayanımlarının belirlenmesi ve başarılı bir şekilde şekillendirilen numunelerde geri esneme davranışlarının incelenmesini içermektedir. Ayrıca, elde edilen verilerin analizi ile üretim parametrelerini ve ısıl işlem koşullarının malzemenin performansına olan etkilerinin anlaşılması da hedeflenmektedir.

Bu tezin temel amacı, SLM yöntemiyle üretilen 17-4 PH paslanmaz çeliğinde uygulanan ısıl işlemlerin, malzemenin mekanik özellikleri ve V bükme ile deformasyon dayanımının belirlenmesi ve test sonrasında malzemenin sırasında gösterdiği geri esneme davranışına parametrelerin etkilerini incelemektir. 17-4 PH çeliği, çökelme sertleşmesi mekanizması sayesinde çeşitli ısıl işlem süreçleri ile çok sayıda sektörde kullanılabilen mekanik özellikler sunmaktadır. Bu özellik, bu araştırmanın odak noktası olup, ısıl işlem parametrelerinin mikro yapı dönüşümleri ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini anlamak ve malzemenin nihai performansını optimal şekilde iyileştirmeyi amaçlamaktadır.

Tez altı bölüm olarak yapılandırılmıştır. Birinci bölümde araştırma konusu ve çalışmanın kapsamı, amacı ve önemi açıklanmıştır. İkinci bölümde, literatürde mevcut olan SLM teknolojileri, 17-4 PH çeliğinin özellikleri ve ısıl işlem uygulamalarına dair çalışmalar inceleniş ve mevcut bulgular derlenmiştir. Üçüncü bölümde, kullanılan deney malzemesi ve proses parametreleri, ısıl işlem parametreleri, deney parametreleri verilmiştir. Dördüncü

bölüm, elde edilen bulguların sonuçları ve analizini içermekte, mikro yapı değişimleri ve mekanik test sonuçları arasındaki ilişki tartışılmıştır. Ayrıca bu bölümde, elde edilen araştırma sonuçları literatür ile karşılaştırılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Son bölümde ise, araştırmanın ana bulguları özetlenmiş ve gelecekteki çalışmalara yönelik önerilerde bulunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürde eklemeli imalat yöntemiyle üretilen paslanmaz çelik malzemelerin ısıl işlemi ve mekanik özelliklerindeki değişimi üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Ayrıca eklemeli imalat yöntemiyle üretilen paslanmaz çeliklerin işlenebilirliği de literatürde detaylıca araştırılmıştır.

2.1. 17-4 PH Malzemesinin Eklemeli İmalat ile Üretimi, Isıl İşlem ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

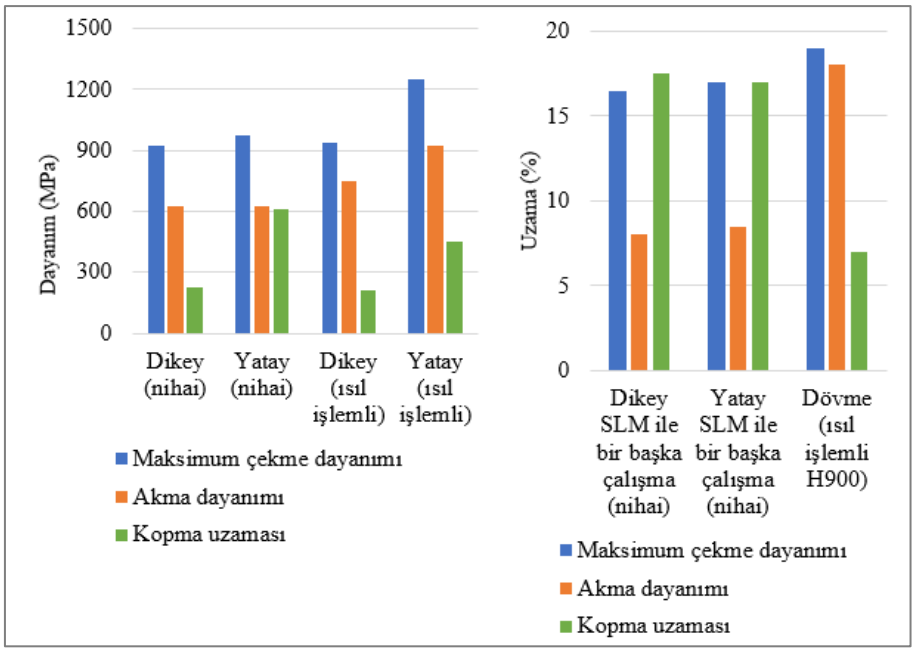
Mahmoudi çalışmasında, Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen 17-4 PH paslanmaz çeliğin mekanik özelliklerini ve mikroyapısal karakterizasyonunu incelemiştir. Çalışmasında, üretim sürecinde kullanılan lazer enerji yoğunluğunun, 17-4 PH paslanmaz çeliğin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerinde etkisi olduğunu gözlemlemiştir. Proses parametrelerinin optimizasyonu kullanılarak üretilen numunelerin, optimize edilmemiş parametrelere kıyasla %5 düşük akma dayanımına ve %10 maksimum çekme dayanımına sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Çalışmada kullanılan SLM proses parametreleri Çizelge 2.1'de verilmiştir [1].

Çizelge 2.1. 17-4 PH paslanmaz çelik test numunelerinin üretimi için SLM proses parametreleri [1]

	Lazer gücü (W)	Lazer tarama hızı (mm/s)	Tarama adımları arasındaki boşluk miktarı (µm)	Katman kalınlığı (µm)	Enerji yoğunluğu (mm^2)
Üreticinin tavsiye ettiği	49	350	50	30	93.3
Optimize edilmiş proses parametreleri	48	300	50	30	106.7

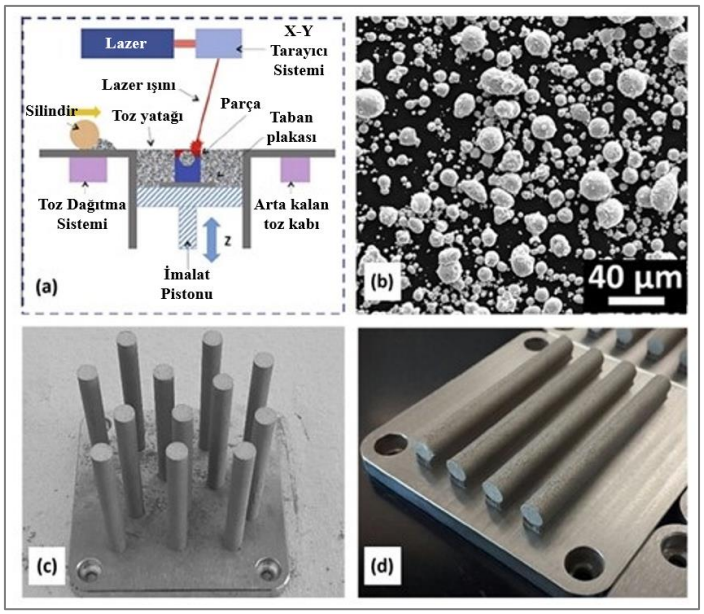
Sabooni, Lazer Toz Yatağı Füzyon (L-PBF) yöntemiyle üretilen 17-4 PH paslanmaz çeliğin işlem sonrası etkilerini incelemiştir. Kimyasal toz bileşeni ve ısıl işlem koşullarının, numunenin mikroyapısını etkilediğini belirlemiştir. 480 °C'de yapılan yaşlandırma işleminin, numunenin mukavemetini arttırdığı ancak martensitik yapıya sahip numunelerin daha hızlı bir yaşlanma sertleşme tepkisi gösterirken ferritik numunelerde gecikmiş sertleşme olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca yüksek soğuma hızlarının L-PBF işlemi sırasında denge dışı fazların oluşumuna neden olabildiği gözlenmiştir [2].

Yadollahi ise çalışmasında Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen 17-4 PH paslanmaz çelik malzemenin mekanik özelliklerini araştırmıştır. Eklemeli imalat yöntemi ile üretilen malzemelerin geleneksel yöntemlerle üretilen malzemelere kıyasla çekme mukavemetinde benzer veya daha üstün özelliklerin olduğunu gözlemlemiştir. Bu durumunun, SLM sürecinin hızlı soğuma hızları sayesinde parçanın içinde yayılan ince mikroyapının gelişimini desteklemesinden kaynaklandığını ortaya koymuştur. Diğer SLM çalışmalarına kıyasla, dikey ve yatay olarak inşa edilen numunelerin yapı oryantasyonuna göre %5 ile %12 arasında akma mukavemetinin daha yüksek olduğu belirlemiştir [3]. SLM yöntemiyle üretilen 17-4 PH malzemelerin mekanik özelliklerinin kıyaslamaları Şekil 2.1 verilmiştir.

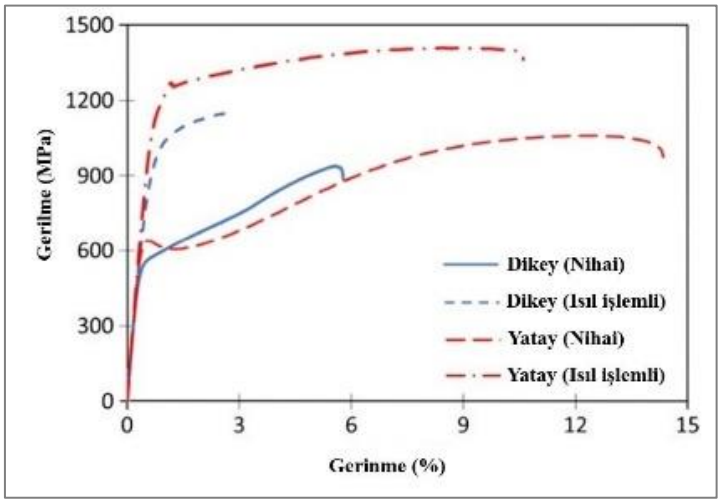


Şekil 2.1. SLM ile üretilen 17-4 PH SS'in farklı koşullardaki çekme özellikleri ve diğer araştırmalarla karşılaştırılması [3]

Yadollahi de çalışmasında, Seçici Lazer Ergitme (SLM) ile üretilen 17-4 PH paslanmaz çeliklerin yorulma davranışı üzerine yapı oryantasyonu ve ısıl işlemin etkilerini incelemiştir. Dikey ve yatay olarak inşa edilen numuneler arasında farklı yorulma dayanımları gözlemlemiştir. Yaşlandırma sırasında oluşan çökelmelerin, malzemenin dayanımını artırarak daha yüksek akma ve maksimum dayanım değerlerine yol açtığı tespit edilmiştir [4]. Çalışmanın aşamaları Şekil 2.2'de, deney numunelerinin çekme testi sonucu elde edilen gerilme-gerinim eğrileri de Şekil 2.3'de verilmiştir.



Şekil 2.2. (a) SLM üretim sürecinin şeması, (b) 17-4 PH SS tozu ve SLM 17-4 PH SS numunelerinin SEM görüntüsü, (c) dikey ve (d) yatay olarak üretilmiş çekme çubukları [4]



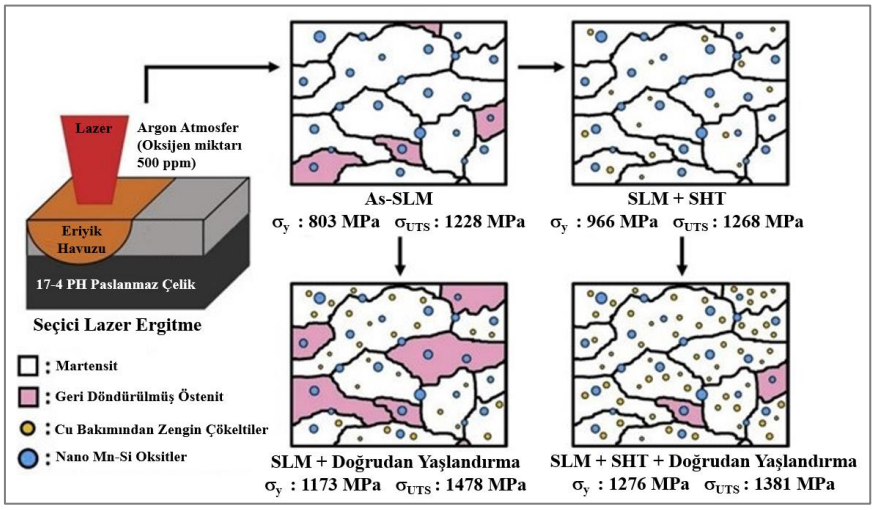
Şekil 2.3. SLM 17-4 PH'ın farklı yapı oryantasyonlarındaki gerilme-gerinme eğrisi [4]

Hsu, Chang vd. çalışmalarında, Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen 17-4 PH paslanmaz çeliğin mikroyapı ve mekanik özelliklerinine farklı ısıl işlemlerin etkilerini incelemişlerdir. SLM süreciyle üretilen numunelerde yüksek martensit ve bakır-zengin çökeltilerin varlığının, akma dayanımı ve sertlikte artışa neden olduğunu tespit etmişlerdir. Akma dayanımındaki artışın kaynağı olarak nano oksit dispersiyonu ve ince martensit katkısının etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir. Çözelti Isıl İşlemi (SHT), sonrası işlemlerin oksit dispersiyonunu sürekli olarak güçlendirdiği tespit etmişlerdir. SHT ve hızlı soğutma sonrası yaşlanma işlemlerinin, martensit fraksiyonunu artırarak mukavemeti yükseltebildiği,

SLM sürecinin mikroyapı mühendisliğinde potansiyel avantajlara sahip olduğunu ve oksit dispersiyonunun numunelerin güçlendirilmesi için etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymuşlardır [5]. Farklı ısıl işlemlerin mekanik özelliklerine etkilerini Çizelge 2.2'de verilmiştir. Ayrıca SLM ile üretilmiş parçaların mikro yapı özellikleri Şekil 2.4'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Vickers sertliği, çekme testi sonuçları ve pekleştirme [5]

	C&W+SHT	C&W+SHT+ Yaşlandırma	SLM	SLM+ConA	SLM+ConA+ Yaşlandırma	ConA+ Doğrudan Yaşlandırma
Hv	357.4±10.3	401.5±6	365.4±6.7	420.1±6.8	488.6±5.5	453.2±4.6
σ_Y (MPa)	820±19	1113±5	803±49	966±42	1276±16	1173±89
σ_{UTS} (MPa)	1040±2.5	1138±1.5	1228±7.5	1268±2.5	1381±3	1478±1
εr (%)	7±0.2	12.1±0.1	12.7±1.4	8.8±0.9	13.6±0.3	9.8±1.3
n	0.12	0.05	0.29	0.14	0.07	0.17



Şekil 2.4. SLM ile üretilmiş 17-4 PH'ın mikroyapı-özellik korelasyonunun şematik gösterimi [5]

Weaver, Whiting vd., toz ve katı halde üretilen 17-4 PH paslanmaz çelik parçaların reolojik ve mekanik özellikleri üzerinde toz boyutunun etkilerini incelemişlerdir. İnce tozun genel performansının en düşük olduğu, kaba tozun ise en iyi performansa sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Bununla birlikte, bu performans farklılıklarına rağmen, üretilen parçaların mikroyapılarının büyük ölçüde aynı olduğu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, orta boyutlu tozun en yüksek mekanik özelliklere sahip parçaların üretiminde etkili olduğu belirlenmiştir. İnce ve kaba tozların neredeyse aynı mekanik özelliklere sahip olsa da uzama değeri kaba toz için biraz daha yüksek bulunmuştur. Partikül boyutu dağılımının toz performansı ve üretilen

parçaların mekanik özellikleri üzerinde belirleyici bir rol oynadığı ve orta boyutlu tozun en iyi performansa sahip olduğunu belirlemişlerdir [6]. Farklı boyutlara sahip tozların kimyasal bileşeni Çizelge 2.3'te, mekanik özellikleri de Çizelge 2.4'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. İnce, orta ve kaba boyutlu tozların kimyasal bileşeni [6]

Kütle oranı (%)	C	Nb	Cr	Cu	Mn	N	Ni	O	P	S	Si
İnce	0.02	0.22	15.7	3.41	0.04	0.009	3.38	0.074	0.002	0.005	0.59
Orta	0.02	0.33	16.8	4.51	0.22	0.027	4.27	0.042	0.002	0.002	0.35
Kaba	0.02	0.21	16.7	3.56	0.03	0.008	4.21	0.034	0.002	0.005	0.53
OEM 1	<0.01	0.33	15.2	4.19	0.02	0.008	3.66	0.030	0.002	0.004	0.09
OEM 2	0.05	0.25	15.1	4.56	0.46	0.120	4.01	0.038	0.007	0.004	0.69

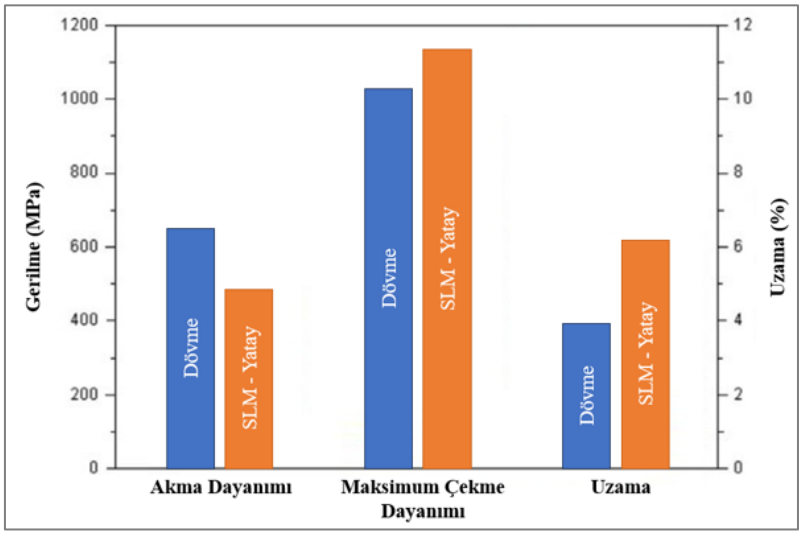
Çizelge 2.4. Mekanik özellik tablosu [6]

Özellik	Dövme H900	Dövme H1150	OEM (Nihai)	OEM H900	İnce (Azaltılmış gerilim)	Orta (Azaltılmış gerilim)	Kaba (Azaltılmış gerilim)
Akma dayanımı (MPa)	1172	690	861±76	1235±10	853±12	880±10	848±13
Maksimum çekme dayanımı (MPa)	1310	862	886±70	1336±5	930±9	978±5	927±8
Uzama (%)	10.0	16.0	9.1±1.2	14.0±0.8	18.3±0.4	19.3±0.4	19.7±0.6

Yu, Chai vd. de çalışmalarında, Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen 17-4 PH paslanmaz çelik numunelerin mekanik davranışını incelemişlerdir. Numunelerin çekme dayanımı, uzama dayanımı, eğilme dayanımı ve kırılma analizini gözlemlemişlerdir. Eklemeli imalat yöntemiyle edilen numuneler benzer çekme ve eğilme dayanıklılıklarına sahip olduğunu tespit etmişlerdir. SLM yöntemiyle üretimi sırasında test numunelerinin başarısız olma nedenlerini erimeyen toz partikülleri, kaynaşmanın eksik olması ve tabakalar arasındaki ayrım gibi faktörlere bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir [7].

Ponnusamy ise yaptığı çalışmada, Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen 17-4 PH paslanmaz çelik numunelerin çekme özelliklerini ve mikroyapısını geleneksel yöntemle üretilen ve dövülmüş 17-4 PH numunelerle karşılaştırmıştır. SLM yöntemiyle üretilmiş numunelerin dövme örneklerle karşılaştırıldığında üstün çekme özelliklerine sahip olduğunu, SLM ile üretilen numunelerin çekme dayanımı ve maksimum çekme dayanımı (UTS) geleneksel yöntemle üretilen numunelerden %12 daha yüksek olduğunu ve SLM numunelerinin akma dayanımının %18 düşük olduğunu tespit etmiştir [8]. SLM yöntemiyle

üretilen ve geleneksel yöntemle üretilen dövme 17-4 PH numunelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5. SLM işlenmiş ve dövülen numuneler arasındaki gerilme özelliklerinin karşılaştırılması [8]

Irrinki çalışmasında, 17-4 PH paslanmaz çelik tozlarının kendine özgü özelliklerini ve Lazer Toz Yatağı Füzyon (L-PBF) işlem parametrelerinin materyalin yoğunluk ve mekanik özellikleri üzerine olan etkilerini incelemiştir. Su ve gaz atomizasyon yöntemleriyle elde edilen tozların yüksek enerji yoğunluğu altında sinterlenmesi durumunda, malzemelerin yoğunluk ve mekanik özelliklerinin benzeştiği gözlemlenmiştir. Çalışma, farklı atomizasyon teknikleri kullanılarak üretilen tozların, L-PBF işlemi altında sergiledikleri davranışların karşılaştırmalı analizini yaparak, bu prosedürlerin endüstriyel uygulamalara olan potansiyel etkilerini ortaya koymuştur. Gaz atomizasyon yöntemiyle üretilen tozlar kullanılarak elde edilen 17-4 PH paslanmaz çelik bileşenlerin, malzemenin yoğunluğunu ve mekanik özelliklerini geliştirebilecek potansiyeli olduğunu ortaya koymuştur. Buna ek olarak, elde edilen parçaların mukavemeti ve gerilme altında gösterdiği uzama gibi mekanik değerlerinin, malzemenin yoğunluğu ile doğrudan ilişkili olduğunu saptamıştır [9]. Çalışmasında kullanılan parçacık özelliklerini Çizelge 2.5'te, L-PBF işlem parametreleri de Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.5. 17-4 PH paslanmaz çelik su ve gaz atomize tozların parçacık özellikleri [9]

Toz	Şekil	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)	Boyut genişliği 2.56/log10 (D90/D10)
Gaz atomizeli (G)	Küresel	5	13	27	3.5
Su atomizeli (W) 1	Düzensiz	10	17	28	5.7
Su atomizeli (W) 2	Düzensiz	16	24	37	7.0
Su atomizeli (W) 3	Düzensiz	26	43	67	6.2

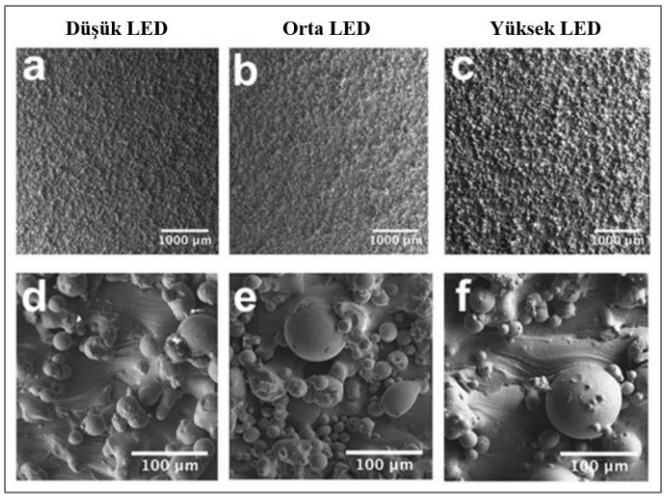
Çizelge 2.6. Bu çalışmada kullanılan L-PBF işleme koşulları [9]

Koşul	Lazer gücü (W)	Tarama hızı (mm/s)	Tarama adımları arasındaki boşluk miktarı (µm)	Katman kalınlığı (µm)
Koşul 1	195	1550	50	30
Koşul 2	195	1250	50	30
Koşul 3	150	1550	50	30
Koşul 4	150	1250	50	30

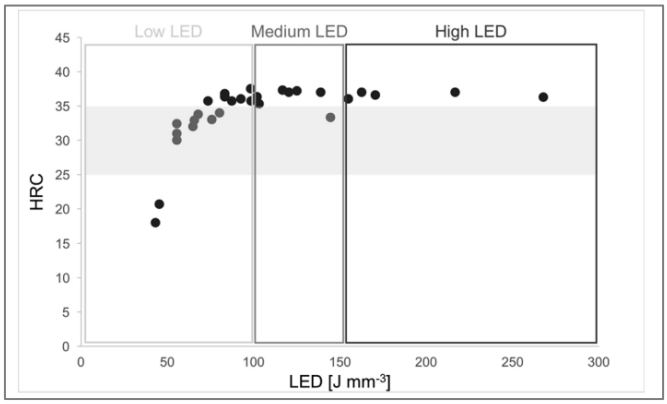
Tonelli, Fortunato ve Ceschini gerçekleştirdiği çalışmada, 17-4 PH paslanmaz çelik parçalar üzerinde, Seçici Lazer Ergitme (SLM) prosesi sırasında Lazer Enerji Yoğunluğu'nun (LED) mikroyapı, yüzey morfolojisi ve malzemenin sertliği üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde, yüksek LED değerlerinin, optimizasyon sonrasında yüzey kalitesi ve sertlikte önemli iyileşmeler sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, kobalt (Co)-krom (Cr) alaşımının SLM işlemi sırasında LED'nin etkisini incelemiş ve bu alaşım için de yüksek LED değerleri kullanıldığında yüzey kalitesi ve sertlikte benzer şekilde iyileşmeler olduğunu gözlemlemişlerdir [10]. Deneysel çalışmalarında kullanılan proses parametreleri Çizelge 2.7'de, malzemenin mikroyapı görüntüleri Şekil 2.6'da ve sertlik ölçümleri de Şekil 2.7'de verilmiştir.

Çizelge 2.7. Örneklerin üretimi için kullanılan ve farklı LED = P/(v.h.d) değerlerine yol açan proses parametreleri [10]

P [W]	v [mm/s]	h [mm]	d [mm]	LED [J/mm³]
70; 90; 110; 130; 150	500; 700; 900; 1100	0.04;0.06; 0.08	0.02;0.03	43.21 – 267.86



Şekil 2.6. Düşük ve yüksek büyütmeli SEM mikrografları ile işlenmiş temsili numunelerin yanal yüzeyleri: (a) ve (d) Düşük LED, (b) ve (e) Orta LED, (c) ve (f) Yüksek LED [10]



Şekil 2.7. LED'in bir fonksiyonu olarak SLM numunelerinin sertliği (HRC) [10]

Yin, Gienger, Croom ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 17-4 PH paslanmaz çeliğin farklı tedarikçilerden elde edilen malzemelerdeki mekanik özellikleri ve mikroyapılarındaki potansiyel farklılıkları incelemişlerdir. Gerçekleştirilen standart çözelti tavlaması ve ısıl işlem sonucunda, tedarikçi kaynaklı küçük istisnalar dışında, mikroyapı ve mekanik özelliklerin genellikle benzer olduğu belirlenmiştir. Araştırma, özellikle nitrojenle atomize edilmiş toz kullanıldığında artan östenit içeriğinin, malzemenin akma noktasını etkileyen bir faktör olduğunu ve yüzey pürüzlülüğünün artışının yorulma ömrünü negatif yönde etkilediğini bulmuştur. Buna karşın, 17-4 PH paslanmaz çeliğin geleneksel ısıl işlem ve yüzey işlemleri uygulandığında, beklenen mukavemet ve performans değerlerini göstererek, standart döküm bileşenlerin davranışına benzer özellikler sergilediği tespit

edilmiştir [12]. Farklı tedarikçilerden elde edilen numunelerin ısıl işlem geçmişi Çizelge 2.8'de ve mekanik özellikleri de Çizelge 2.9'da verilmiştir.

Çizelge 2.8. Çekme ve yorulma test numuneleri için işlem geçmişinin tedarikçiye özgü özeti [12]

Tedarikçi	Hammadde toz Atomizasyon Gazı	Koruyucu Gaz	Eİ Makinesi	Lazer Gücü (W)
1	Argon	Bilinmiyor	ProX DMP 320	Maks. 500
2	Argon	Nitrojen	EOSINT M270	Maks. 200
3	Argon	Argon	EOS M290	Maks. 400
4	Argon	Nitrojen	GE Mlab R	90
5	Nitrojen	Argon	SLM®280	400
Bu çalışma (JHU/APL)	Argon	Argon	EOS M290	220.1

Çizelge 2.9. Tüm tedarikçiler ve JHU/APL için ortalama gerilme özelliği değerleri [12]

Tedarikçi	Yapı Oryantasyonu	Akma Dayanımı (MPa)	Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
1	XY	827	850	13.9
	Z	768	844	13.1
	HT (Z)	1242	1379	8.4
2	XY	806	903	18.6
	Z	763	885	12.3
	HT (Z)	1036	1185	3.4
3	XY	728	898	16.3
	Z	827	930	10.5
	HT (Z)	1311	1402	6.9
4	XY	1139	1293	18.2
	Z	1206	1396	8.6
	HT (Z)	1330	1570	5.0
5	XY	431	848	15.6
	Z	421	836	14.7
	HT (Z)	952	1325	12.9
JHU/APL (Bu çalışma)	XY	808	917	17.3
	Z	906	1083	8.3
	HT (Z)	1106	1177	5.6

Abdullah, Dhami ve Khan tarafından yürütülen araştırmada, Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemi kullanılarak üretilen 17-4PH paslanmaz çelik malzemelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Numuneler üzerinde gerçekleştirilen çekme testleri, eğilme mukavemeti değerlendirmeleri ve kırılma analizleri, bu parçaların, geleneksel eklemeli imalat teknikleriyle üretilen numuneler ile karşılaştırılabilir seviyede mekanik performans sergilediğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, numune başarısızlıklarının, erimemiş toz

partikülleri, yetersiz füzyon ve katman arası delaminasyon gibi üretim kalitesiyle ilgili sorunlardan kaynaklandığını tespit etmişlerdir [13]. Test numunelerin üretim aşaması Şekil 2.8'de mekanik özellikleri de Çizelge 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.8. Alt tabaka plakası üzerinde fabrikasyon halindeki numune [13]

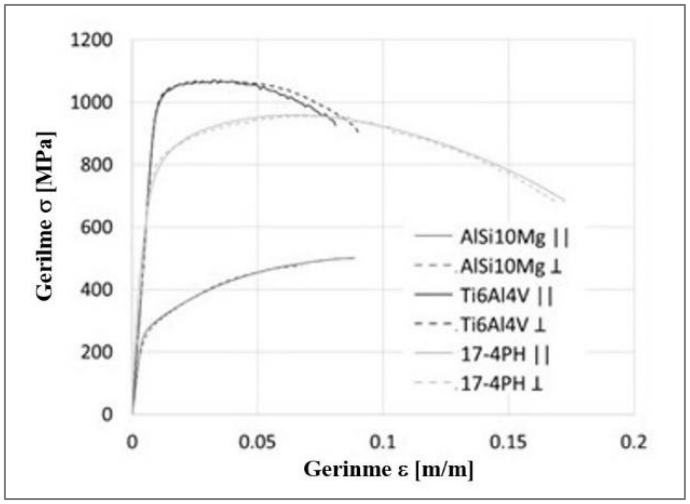
Çizelge 2.10. Test numunelerinin maksimum çekme dayanımı ölçümleri [13]

Test numunesi	Uygulanan yük P (kN)	Maksimum Çekme Dayanımı (MPa) (σ_{UTS}= $P/A_{0)}$	Ortalama Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)
1	25.50	1062.5	1076
2	26.22	1092.5	
3	25.75	1072.9	

Nalli, Cortese ve Concli çalışmalarında, Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemi kullanarak üretilmiş Ti6Al4V, 17-4PH ve AlSi10Mg alaşımlarının sünek hasar özelliklerini incelemişlerdir. AlSi10Mg alaşımı dışında, incelenen diğer alaşımlar benzer işlemlerle ham madde formundan işlenerek elde edilmişlerdir. Gerçekleştirilen çekme testleri sonuçları, işlenmiş ve eklemeli üretim tekniğiyle hazırlanan malzemelerin, akma ve nihai çekme mukavemeti bakımından benzer özellikler gösterdiğini ortaya koymuştur. Araştırma da ayrıca; SLM tekniğiyle üretilen metal parçaların, geleneksel döküm ya da işleme yöntemleriyle üretilen parçalara kıyasla yorulma performansı açısından üstün özelliklere sahip olabileceği belirlenmiştir [14]. Çizelge 2.11'de test malzemelerinin mekanik özellikleri, Şekil 2.9'da da gerilme-gerinim eğrilerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 2.11. Test numunelerinin mekanik özellik ölçümleri [14]

Malzeme	Akma Dayanımı (MPa)	Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)	Kırılma uzaması (%)
AlSi10Mg (Yatay)	270±10	460±20	9±2
AlSi10Mg (Dikey)	240±10	460±20	6±2
Ti6Al4V (Yatay)	1140±50	1290±50	7±3
Ti6Al4V (Dikey)	1120±80	1240±50	10±3
17-4 PH (Yatay)	860±25	886±70	20±1
17-4 PH (Dikey)	861±45	924±65	20±1



Şekil 2.9. İşlenmiş numuneler (ekseni yapı yönüne paralel (||) ve dik (⊥) olan: a) AlSi10Mg; b) Ti6Al4V; c) 17-4PH) üzerindeki çekme testlerinden değerlendirilen mühendislik gerilme-gerinme eğrilerinin karşılaştırılması [14]

Ponnusamy, Masood, Ruan vd. tarafından yürütülen çalışmada, Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen 17-4 PH paslanmaz çelik numunelerin mikrosertlik, mukavemet, akma mukavemeti, gözeneklilik ve basınç altında gerilme-şekil değiştirme davranışlarını etkileyen dört ana işlem parametresinin lazer gücü, yapının yönlendirilmesi, katman kalınlığı ve lazer odak uzaklığı rolü araştırmışlardır. Çalışmanın sonuçlarına göre, her bir işlem parametresinin malzemenin mikrosertliği ve mekanik özellikleri üzerinde farklı etkilere sahip olduğu tespit edilmiştir. Yapı odak yönlendirmesi mikrosertlik üzerinde sınırlı bir etkiye sahipken, lazer gücünün artışının mikrosertlik değerlerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, kalınlığın azaltılması ve odak uzaklığının ayarlanmasıyla basınç dayanımının iyileştiği belirlenmiştir. Araştırmacılar, optimum mikrosertlik ve basınç dayanımı değerlerine ulaşmak için 270 W lazer gücü, dikey yönlendirme, 30 µm katman kalınlığı ve -6 mm lazer odak uzaklığı parametrelerinin elverişli olduğunu tespit etmişlerdir

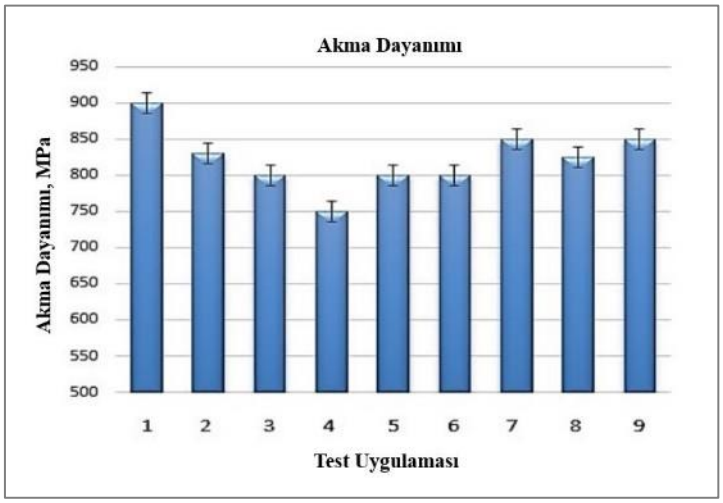
[15]. Çizelge 2.12'de SLM parametrelerini, Çizelge 2.13'de de proses parametreleri verilmiştir. Şekil 2.10'da da test numunesinin akma dayanımı verilmiştir.

Çizelge 2.12. Temel SLM parametreleri için deney tasarımı [15]

Etkenler	Parametre	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A	Lazer gücü (maks. 300 W)	W	240	255	270
B	Yapı Yönlendirmesi	derece	0	45	90
C	Lazer Kalınlığı	µm	30	35	40
D	Odak dışı mesafe	mm	-6	-3	-1

Çizelge 2.13. Deneysel plan ve planın tepkisi [15]

Uygulama	A	B	C	D	Ortalama Mikro Sertlik (±2 HV)	Son Basınç Dayanımı (MPa)
1	80	0	30	-6	304	1132
2	80	0	35	-3	301	1053
3	80	0	40	-1	295	1053
4	85	45	35	-1	281	1076
5	85	45	30	0	319	1028
6	85	45	35	3	317	1046
7	90	90	40	3	309	1064
8	90	90	30	-1	308	1043
9	90	90	35	-6	310	1059



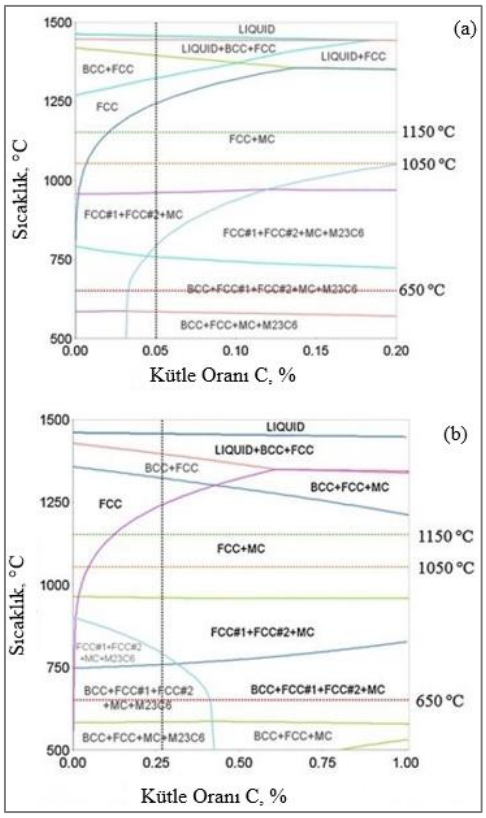
Şekil 2.10. 17-4 PH SLM numunelerinin akma dayanımı [15]

Cheruvathur, Lass ve Campbell çalışmalarında, dövme 17-4 PH paslanmaz çeliğin mikroyapısal analizi gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı boyunca haddeleme yönüne paralel d-ferrit şeritlerin varlığı saptanmıştır. Tavlama işleminden sonra, malzemenin sertliğinin ortalama 322 ± 10 Vickers olduğu tespit edilmiş ve mikroyapı detaylı olarak incelenmiştir.

Matris içerisinde yaklaşık 1 μm büyüklüğünde çökeltilerin mevcut olduğu belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada, endüstriyel uygulamalarda yarar sağlayan Yüzey Merkezli Kübik (FCC) + Metalkarbid (MC) fazlarının tercih edilen sıcaklık aralığı olan 1050°C ile 1250°C arasında ısıl işlemler yapılsa dahi, düşük sıcaklık rejimlerinin yavaş difüzyon kinetiği nedeniyle homojen mikroyapı sağlamada yetersiz kalabileceği gözlemlenmiştir. Öte yandan, yüksek sıcaklık rejimlerinin mevcut karbürlerin büyümesine kaçınılmaz olarak yol açtığı vurgulanmıştır. Çalışma, bu sebeplerle, 17-4 PH çeliğin ısıl işlem parametrelerinin sıcaklık ve homojenizasyon süresinin özellikle eklemeli imalat yöntemleri kullanıldığında titizlikle optimize edilmesinin önemini ortaya koymuştur [16]. Numunelerin ısıl işlem sonrası sertlik değerleri Çizelge 2.14'de, kütle faz diyagramları Şekil 2.11'de verilmiştir.

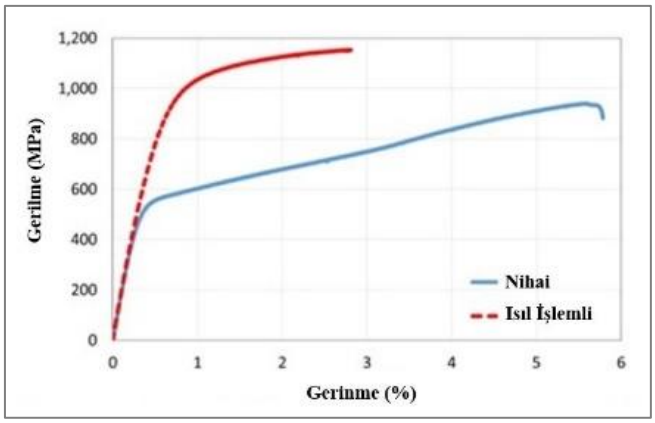
Çizelge 2.14. Isıl işlem sonrası sertlik değerleri [16]

Numune detayları	Etiket	Sertlik (VHN)
Eİ – nihai	AM – AB	258 ± 8
Eİ – EOS stres giderici ısıl işlem	AM – SR	312 ± 17
Eİ – dövme çözeltitlendirici ısıl işlem	AM – S	318 ± 24
Eİ – AMS 5355 homojenizasyon ısıl işlem	AM – H	288 ± 32
Dövme – alındığı gibi	W – AR	322 ± 10
Dövme – çözelti ile iyileştirilmiş koşul	W – S	299 ± 11

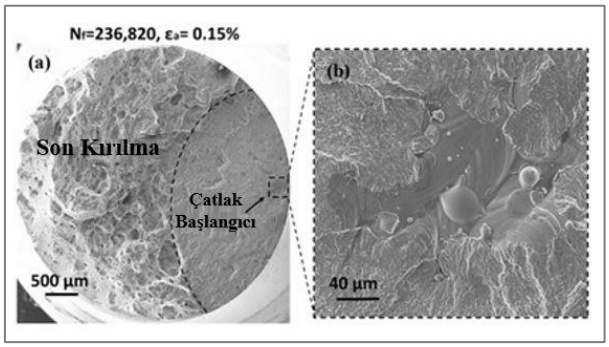


Şekil 2.11. Değişen kütle için faz diyagramının izoplet kesiti (a) C ve (b) Nb fraksiyonları. Alaşımın bileşimini noktalı dikey çizgi gösterirken, yatay noktalı çizgiler çeşitli ısıl işlem sıcaklıkları gösterir [16]

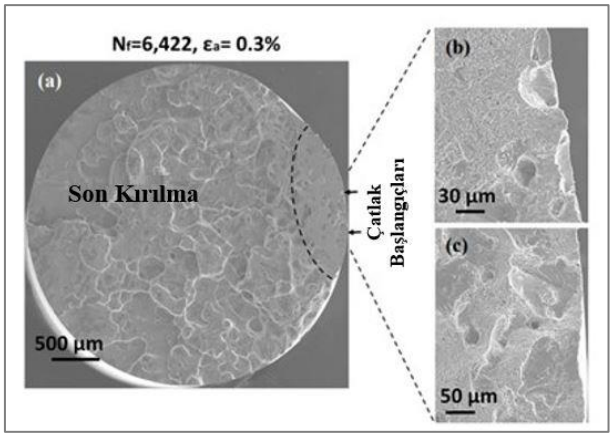
Yadollahi'de çalışmasında, Seçici Lazer Ergitme (SLM) ile üretilen 17-4 PH paslanmaz çeliğin yorulma dayanımını incelemiştir. Araştırmanın bulgularına göre, SLM ile üretilen 17-4 PH numunelerin yorulma ömürleri, geleneksel işleme yöntemleriyle üretilen numunelere kıyasla daha kısa bulunmuştur. Isıl işlemin, SLM ile işlenmiş 17-4 PH numunelerini sertleştirerek yorulma ömrünü azalttığı tespit edilmiştir [17]. Isıl işlemin gerilmeye etkisi Şekil 2.12'de numunelerde kırılma yüzeylerinin görüntüsü de Şekil 2.13'de ve Şekil 2.14'de verilmiştir.



Şekil 2.12. Nihai ve ısıl işlem görmüş koşullarda SLM 17-4 PH mühendislik gerilme-gerinme eğrileri [17]

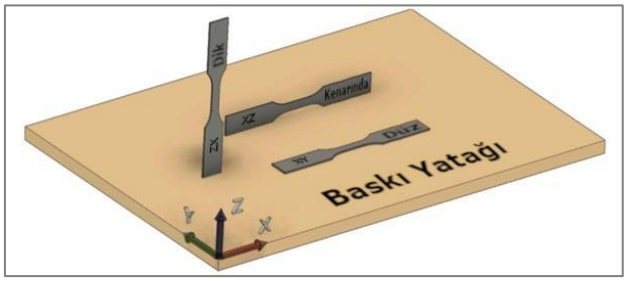


Şekil 2.13. (a) %0,15 (Nf = 236.820) gibi düşük bir gerilme genliğinde dikey bir as-built numunesi için kırılma yüzeyinin genel görünümü ve (b) yorulma çatlaklarının yüzeye yakın erimemiş bir bölgeden başladığını gösteren çatlak başlangıç bölgesinin büyütülmüş görünümü [17]



Şekil 2.14. (a) %0,3 gerinme genliğinde (Nf = 6.422) dikey bir as-built numunesi için kırılma yüzeyinin genel görünümü ve çatlak başlangıç bölgelerinin büyütülmüş görünümü (b) numune yüzeyinin altındaki boşluklar ve (c) yüzeye yakın erimemiş bir bölge [17]

Kedziora yaptığı çalışmada, Seçici Lazer Ergitme (SLM) ve Metal Fused Filament Fabrication (FFF) yöntemleri kullanılarak üretilen paslanmaz çelik numuneler mekanik performans, çekme, yorgunluk ve darbe dayanıklılığı yönlerinden araştırılmıştır. İki farklı SLM yazıcı, Intamsys Funmat HT ve Markforged Metal X kullanılarak numuneler üretilmiştir. Her iki yöntemle üretilen numunelere %100 doluluk oranında ve 700°C'de iki saat boyunca gerilim giderme işlemi uygulanmıştır. SLM ve Metal FFF yöntemleriyle üretilen numuneler arasında yapılan karşılaştırmalı analizler, SLM teknolojisinin, daha güçlü ve sünek malzemeler ürettiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, SLM ile üretilen 17-4 PH çeliğinin örnekleri 316L paslanmaz çeliğe kıyasla daha kırılgan bir yapı sergilediği belirlenmiştir. Yapılan analizler, SLM ile üretilen numunelerin yapısal performansının, Metal FFF numunelerini aşan sonuçlar ortaya koyduğunu göstermiştir. SLM'nin XY inşa yönlendirmesiyle üretilen örnekleri, aralarında en yüksek çekme dayanımını sergilediği saptanmıştır. Yüksek gözenekliliğe sahip numunelerde, sunulan her iki malzemede de düşük mekanik dayanım ve uzama değerlerinin gözlendiği belirlenmiştir [18]. Üretilen numunelerin yapı yönelimleri Şekil 2.15'te verilmiştir. Farklı yazıcılarda kullanılan parametreler de Çizelge 2.15 ve Çizelge 2.16'da verilmiştir.



Şekil 2.15. Basılı numune ve önceden tanımlanmış yapı yönelimleri [18]

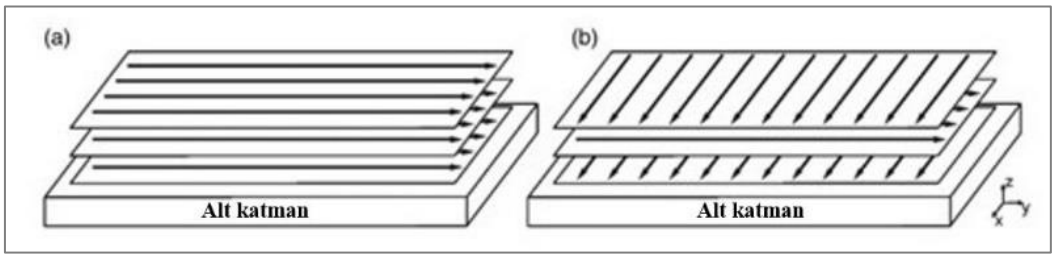
Çizelge 2.15. EOS M 290 ve Renishaw Eİ 400 yazıcıda kullanılan SLM işlem parametreleri [18]

Baskı Parametreleri	EOS M 290	Renishaw AM 400
Katman yüksekliği, µm	40	40
Lazer gücü, W	*	180
Odak çapı, µm	100	70
Tarama mesafesi, mm	*	0.11
Koruyucu gaz	Argon	Argon
Oksijen içeriği, %	*	0.15

Çizelge 2.16. Çekme testlerinin sonuçları (ortalama ± standart sapma) [18]

Parametreler	Markforged 17-4 PH	BASF Ultrafuse 316L	EOS M 290 316L (HT)	Renishaw AM 400 316L
Akma dayanımı, R_{02}, MPa	441.0 ± 55.4	152.9 ± 61.3	375.2 ± 22.4	443.1 ± 15.7
Çekme dayanımı, R_m, MPa	495.9 ± 77.0	314.0 ± 41.7	533.2 ± 1.1	570.8 ± 4.4
Kırılma uzaması A, %	0.4 ± 0.1	10.2 ± 5.0	38.2 ± 0.1	38.8 ± 0.1
Young katsayısı, E, GPa	142 ± 65	160 ± 22	190 ± 18	129 ± 17

Li, Deng, Hou ve diğerleri, eklemeli imalat yoluyla üretilen paslanmaz çelik mikroyapısının ve mekanik özelliklerinin incelenmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmada, lazer tarama yolunun morfolojik evrim üzerindeki etkisinin belirleyici olduğu ve mekanik özelliklerin termal işlem yardımı ile iyileştirilebileceği ortaya konmuştur. Tek yönlü ve zigzag tarama desenleri kullanılarak üretilen 316L paslanmaz çelik numuneler, mikroyapısal ve performans açısından değerlendirilmiştir. Termal işlem sonucunda, malzemenin çekme mukavemetinde bir iyileşme ve tanecik boyutunun belirlenmesinde G ve R faktörlerinin önemli rol oynadığı saptanmıştır. Ayrıca, eklemeli imalat ile üretilen 316L paslanmaz çelik örneklerinin, dövme işlemiyle hazırlanan örneklerle kıyaslandığında daha yüksek çekme mukavemeti sergilediği; ancak uzama değerlerinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. [19].

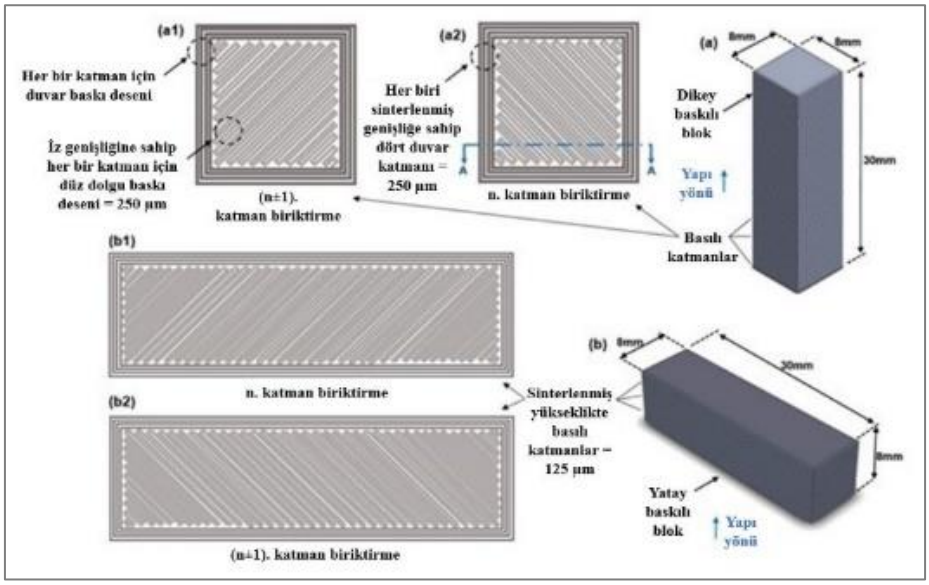


Şekil 2.16. İki farklı lazer tarama modelinin şematik gösterimi, a: tek yön b: zigzag [19]

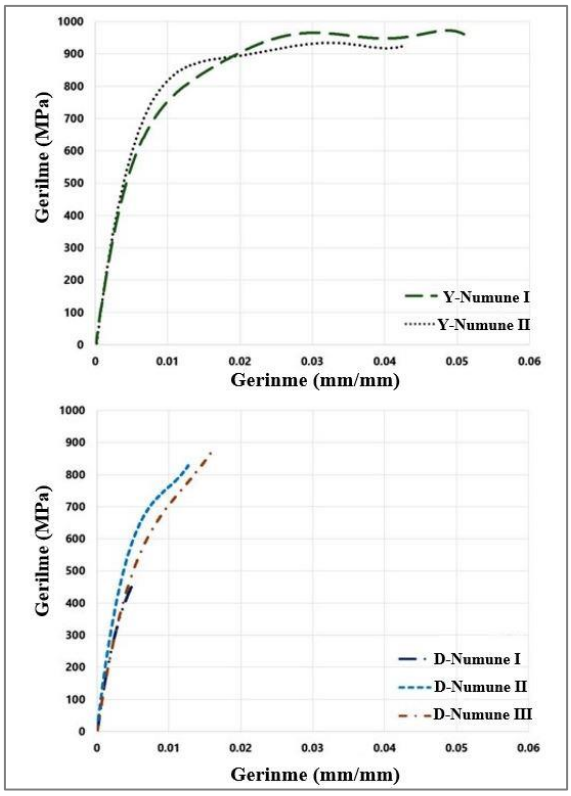
Çizelge 2.17. Biriktirilmiş, biriktirilmiş + ısıl işlem görmüş ve dövülmüş numunelerin çekme verileri [19]

İşleme koşulu	Çekme dayanımı (MPa)	Uzama (%)
USP çekme testi numunesi (Dik)	812.4	14.7
USP çekme testi numunesi (Paralel)	900.6	9.3
WSP çekme testi numunesi (Paralel)	956.3	18.9
WSP çekme testi numunesi (Dik)	941.7	19.4
USP+ısıl işlemli çekme testi numunesi (Dik)	746.9	41.5
USP+ısıl işlemli çekme testi numunesi (Paralel)	753.8	31.7
WSP+ısıl işlemli çekme testi numunesi (Paralel)	867.2	42.9
WSP+ısıl işlemli çekme testi numunesi (Dik)	819.4	43.8
Dövülmüş çekme testi numunesi	526.4	43.2

Ghadimi ve diğerlerinin çalışmasında, 17-4 PH paslanmaz çeliklerin bükülme-yorulma dayanımı ve çekme mukavemeti üzerine eklemeli imalat sürecinde yapı oryantasyonunun etkileri araştırılmışlardır. Markforged Metal X sistemi kullanarak üretilen ve sinterlenen 17-4 PH paslanmaz çelik numuneler üzerinde yürütülen mekanik testlerde, dikey ve yatay yapı oryantasyonu olan numunelerin yorulma ömrü ve uzama etkileri karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, dikey yönlendirmenin yatay yönlendirmeye göre yorulma dayanıklılığı ve uzama bakımından daha az performans gösterdiğini ortaya koymuştur [20].

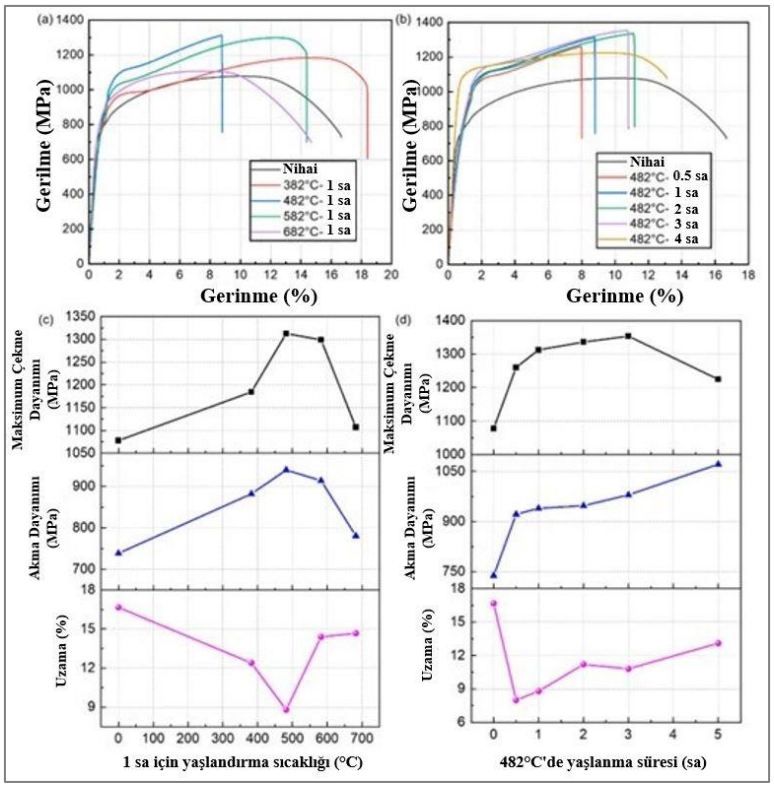


Şekil 2.17. Katmanların şematik katı dolgu ve duvar baskı deseni [20]



Şekil 2.18. Yatay (Y) ve dikey (D) test numuneleri için çekme testi sonuçları [20]

Dong, Wang, Chen vd, Seçici Lazer Ergitme (SLM) ile üretilen 17-4 PH paslanmaz çeliğin farklı yaşlandırma işlemi rejimlerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkilerini incelemişlerdir. Yaşlandırma işleminin martenzitik faza tane büyütme ve çökeltme artışı yoluyla ve östenitik fazın hacim fraksiyonunu yükselterek çelik dayanımını iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Ancak, yaşlandırma ile birlikte çekme dayanımındaki azalma hızlı bir şekilde meydana gelmektedir. Yaşlandırma süresi ve sıcaklığının artışı ile birlikte martenzitik fazın tanecik boyutu büyürken, 482°C'de 3 saat süren yaşlandırma sonrasında östenitik fazın hacim fraksiyonunun arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, araştırma sonuçları, yaşlandırma işleminin çekme dayanıklılığı ve akma mukavemetini artırdığını; fakat çeliğin çekilebilirliğinin bu işlem sonrasında hızla azaldığını göstermiştir [21].

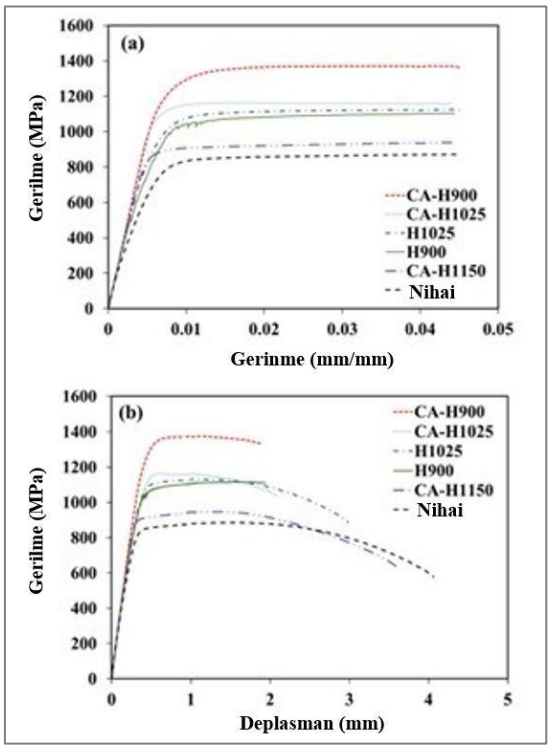


Şekil 2.19. SLM 17-4 PH çelik numunelerinin farklı yaşlandırma sonrası işlem koşulları altında mekanik özellikleri: (a, b) gerilme-gerinim eğrileri ve (c, d) temel gösterge istatistikleri. İlk sıra: 1 saat boyunca farklı yaşlandırma sıcaklıklarında mekanik özellikler, İkinci sıra: 482 C'de farklı yaşlandırma sürelerinde mekanik özellikler [21]

Nezhadfar vd gerçekleştirdiği çalışmada, Lazer Toz Yatağı Füzyonu (L-PBF) ile üretilen 17-4 PH paslanmaz çeliğin yüzey pürüzlülüğü ve buna uygulanan ısıl işlemle birlikte sinerjistik etkilerinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkileri incelemişlerdir. Uygulanan ısıl işlem sonucunda, malzemenin yorulma dayanımındaki artışın yanı sıra işleme ve polisaj işlemleriyle yüzey pürüzlülüğünün minimize edildiği saptanmıştır. Çekme ve yorulma dayanımındaki değişimler, her bir ısıl işlem rejimi sonucunda elde edilen özgül mikroyapısal özelliklerle ilişkilendirilmiştir. Sinerjistik etkilerin değerlendirilmesi adına işlenmiş ve işlenmemiş numuneler, söz konusu ısıl işlemler sonrasında karşılaştırmalı olarak yorulma testlerine tabi tutulmuştur. Isıl işlem uygulanan 17-4 PH paslanmaz çelik numunelerinde yorulma dayanımında bir artış gözlemlenmiş ve yüzey pürüzlülüğünün giderilmesinin yorulma ömrünü önemli derecede iyileştirdiği ifade edilmiştir [22].

Çizelge 2.18. Nihai ve işlenmiş numuneler için dikkate alınan ısıl işlem prosedürleri [22]

Prosedür	Sıcaklık (°C)	Süre (sa)	Sönümleme ortamı
H900	482	1	Hava soğutmalı
H1025	552	4	Hava soğutmalı
CA-H900	1050	0.5	Hava soğutmalı
	482	1	Hava soğutmalı
CA-H1025	1050	0.5	Hava soğutmalı
	552	4	Hava soğutmalı
CA-H1150	1050	0.5	Hava soğutmalı
	621	4	Hava soğutmalı



Şekil 2.20. (a) ekstansometre çıkarma noktasına kadar mühendislik gerilimi-mühendislik gerinimi eğrisi ve (b) kırılmaya kadar mühendislik gerilimi-deplasman eğrisi [22]

Wu, J.-H. ve C.-K. Lin, 17-4 PH paslanmaz çeliğin yüksek sıcaklıklar altındaki çekme ve yorulma özelliklerine dair bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma kapsamında, sıcaklığın artmasıyla akma ve yorulma dayanımında bir azalma gözlenmiştir; buna karşılık, 400°C'de uzun süre test edilen koşul A özelinde bir sertleşme etkisi tespit edilmiştir. Yorulma test sonuçları, özellikle kısa ömürlü test bölgesinde sıcaklık artışının yorulma dayanıklılığını azalttığını gösterirken, uzun ömürlü test bölgesinde 400°C'de test edilen koşul A'ya ait numunelerin, düşük sıcaklıklarda test edilenlere göre daha yüksek yorulma dayanımı

sergilediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, 300°C ve 400°C gibi yüksek sıcaklıklarda yorulma testine tabi tutulan numunelerde, yorulma çatlağının genellikle yüzeyden ziyade iç kısımlardan başladığı gözlemlenmiştir. Sıcaklığın yükselmesiyle birlikte akma dayanımının genel bir azalmaya uğradığı, ancak 400°C'de düzenlenen uzun süreli 'A' durumu testlerinde akma dayanımının artış gösterdiği tespit edilmiştir. Diğer test durumları, tutma süreleri farklılıklarına rağmen aynı sıcaklık seviyelerinde önemli bir akma dayanımı değişikliği göstermediğini gözlemlemişlerdir [23].

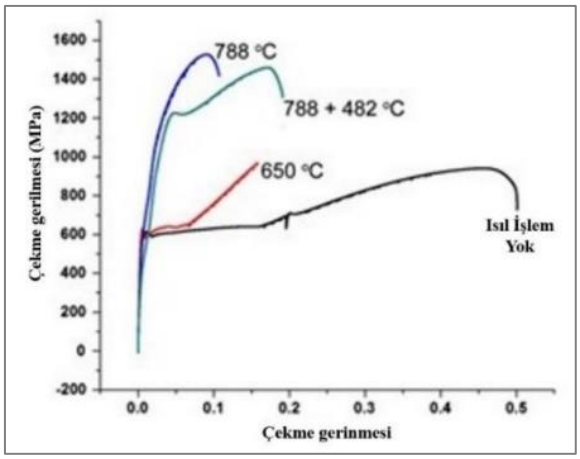
Çizelge 2.19. Yüksek sıcaklıklarda 17-4 PH paslanmaz çeliğin geçiş gerilimi ve akma dayanımının karşılaştırılması [23]

Koşul	Geçiş Gerilimi (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Geçiş Gerilimi / Akma Dayanımı
Koşul A, 300°C	924	895	1.03
H900, 300°C	1184	1175	1.01
H900, 400°C	1100	1060	1.04
H1150, 300°C	845	825	1.02
H1150, 400°C	807	750	1.08

H. Khalid, Rafi ve Deepankar Pal, Seçici Lazer Ergitme (SLM) ile üretilen 17-4 PH paslanmaz çelik numunelerin mikroyapısal ve mekanik özelliklerini etkileyen faktörleri analiz etmişlerdir. Araştırmalarında, numuneleri farklı ısıl işlem koşulları uygulamışlardır ve sonrasında çekme özellikleri üzerinde deneyler gerçekleştirmişlerdir. Bulgularda, ısıl işlem görmüş numunelere göre bitmiş numunelerin daha düşük akma dayanımına sahip olduğu tespit etmişlerdir. Özellikle, 2 saat süreyle 788°C'de yapılan ısıl işlem ve ardından 1 saat boyunca 482°C'de gerçekleştirilen ısıl işlem, çekme mukavemeti üzerinde belirgin değişikliklere yol açmıştır [24].

Çizelge 2.20. SLM ile işlenen PH paslanmaz çelik gerilme özellikleri [24]

Malzeme	Koşul	Akma dayanımı (MPa)	Maksimum çekme dayanımı (MPa)	Kırılma uzaması (%)
PH çelik	Nihai	570 (13)	944 (35)	50 (1)
	650°C (2 sa)	619 (1)	915 (38)	12 (1)
	788°C (2 sa)	857 (14)	1487 (10)	7 (1)
	788 + 482°C (2+1 sa)	1126 (14)	1457 (3)	7 (3)
ASM el kitabı 17-4 PH	482°C	1170	1310	10



Şekil 2.21. Farklı ısıl işlem koşulları için N2 atmosferi altında SLM'de işlenen 17-4 PH paslanmaz çeliğin gerilme-gerinme eğrileri [24]

Burns, yaptığı araştırmada iki farklı eklemeli imalat yöntemi kullanarak üretilen 17-4 paslanmaz çeliğin mikroyapısal ve mekanik özelliklerini karşılaştırmalı olarak karakterize etmiştir. Araştırmada tanımlanan Yöntem 1 ve Yöntem 2, akış gazı, lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve katman kalınlığı gibi farklı baskı parametrelerine sahip olmasıyla ayrılmaktadır. Yöntem 1 için gerilim giderme işlemi gerekli bulunmazken, Yöntem 2'de gerilim giderme amacıyla bir ısıl işlem uygulanmıştır. Ayrıca, sıcak izostatik basınç (HIP) ve çözelti yaşlandırması gibi ısıl işlemlerin uygulanma sırası da her iki yöntem arasında farklılık gösterdiği belirtilmiştir. Bu farklılıkların 17-4 paslanmaz çeliğin sonuçta elde edilen mikroyapısal ve mekanik karakterizasyonuna etkisi benzer olduğu tespit edilmiştir [25].

Çizelge 2.21. Yöntem 1 ve 2'de kullanılan 17-4 tozlarının ağırlık yüzdesi cinsinden bileşimleri [25]

Bileşim	Mn	Si	P	S	C	Cr	Mo	Nb	Fe	Cu	Ni
ASTM5622F	<1	<1	<.025	<.015	<.07	15–17	<0.5	<0.45	Denge	3–5	3–5
Yöntem 1	.63	.04	.023	.005	.02	16.5	.15	.22	Denge	3.98	4.27
Yöntem 2	.133	.005	.005	.007	.003	16	.007	.33	Denge	4	4.06

Çizelge 2.22. Yöntem 1 ve 2 için kullanılan bazı temel baskı parametreleri [25]

Baskı parametreleri	Yöntem 1	Yöntem 2
Akış gazı	Ar	Ar
Güç (W)	150	370
Tarama hızı (mm/s)	1200	800
Tarama aralığı (mm)	0.05	0.12
Katman kalınlığı (µm)	40	50

Çizelge 2.23. Yöntem 1 ve 2 için kullanılan bazı temel termomekanik parametreler [25]

Isıl işlem parametreleri	Yöntem 1	Yöntem 2
Gerilme giderme	Yok	1162°C 3 sa
HIP	1038°C	1163°C
	207 MPa	103 MPa
	1 sa	3 sa
Çözeltiye alma	(HIP öncesi)	
	1038°C	1162°C
	1 sa	2 sa
	Hava soğutmalı	Hızlı vak. soğutma
Yaşlandırma	482°C	496°C
	4 sa	4 sa
	Hava soğutmalı	Hızlı vak. soğutma

Çizelge 2.24. Yapı plakasından 90°, 45° ve 0° uzaklıkta inşa edilen yöntem 1 çekme kuponları için mekanik özellikler [28]

	Akma dayanımı (MPa)	Maks. Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
90° kapalı yapı plakası (n = 3)			
Ortalama	1217	1309	2.4
SD	18	20	0.5
45° kapalı yapı plakası (n = 3)			
Ortalama	1215	1323	4.4
SD	12	11	0.6
0° kapalı yapı plakası (n = 3)			
Ortalama	1218	1320	4.1
SD	8	6	0.4

Çizelge 2.25. Üç farklı yapıda, yapı plakasının 90° dışına inşa edilen yöntem 2 çekme kuponları için mekanik özellikler [25]

	Akma dayanımı (MPa)	Maks. Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
Yapı 1 (n = 3)			
Ortalama	1245	1348	10.5
SD	5	3	0.7
Yapı 2 (n = 6)			
Ortalama	1198	1297	9
SD	7	6	1.4
Yapı 3 (n = 6)			
Ortalama	1245	1341	9.1
SD	5	4	1.0

Wee-Do Yoo vd yürüttüğü çalışmada, 17-4 PH paslanmaz çeliğin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerine ısıl işlem süreleri, yaşlandırma işleminin sıcaklığı ve uzun süreli yüksek sıcaklığa maruz kalmanın etkileri detaylı bir şekilde incelemişlerdir. Yaşlandırma işlemi sıcaklığının artırılması ile çeliğin mukavemetinin azaldığı ancak tokluğun arttığı tespit edilmiştir. H900 ve NA koşullarının mikroyapısal karşılaştırılmasında her ikisinin de benzer mikroyapıları sergilediği; ancak H900 koşulunun daha yüksek mukavemet ve darbe direncine sahip olduğu belirlenmiştir. Uzun süreli yaşlandırma testleri sonucunda ise, çeliğin mukavemetinin ve sertliğinin arttığı; buna karşın uzamanın ve darbe enerjisinin azaldığı gözlemlenmiştir. Optimum mekanik özelliklerin 1 saatlik homojenleştirme işlemi süresi ve ardından uygulanan çözelti işlemi ile elde edilebileceğini tespit etmişlerdir [26].

Çizelge 2.26. Isıl işlem koşulları [26]

Koşul	Çözelti Isıl İşlemi	Yaşlanma Giderme Isıl İşlemi	Sıcaklıkta Geçen Süre (saat)	Soğutma Tipi
H900	≤14°C'ye (≤ 55°F) kadar ısıtma	482°C (900°F)	4 saat	Hava
Kon A	1038°C (1900°F) 15–30 dk			Hava
H925	1035°C (1900°F)	495°C (925°F)	4 saat	Hava
H1025	1035°C (1900°F)	552°C (1025°F)	4 saat	Hava
H1075	1035°C (1900°F)	579°C (1075°F)	4 saat	Hava
H1150	1035°C (1900°F)	621°C (1150°F)	4 saat	Hava

Çizelge 2.27. Çözelti işleminin uygulanıp uygulanmamasına göre mekanik özellik [26]

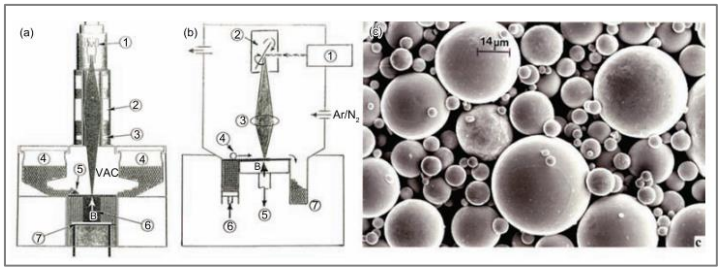
	0,2 Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Etki Enerjisi (J/cm³)	Sertlik (HRC)
H900	1,098	1,317	9.67	7.08	39.5
NA	1,058	1,285	8.4	2.6	40.4

Çizelge 2.28. Mekanik özelliklerin yaşlandırma ısıl işlem koşullarına göre değişimi [26]

Koşul	Çekme Dayanımı (MPa)	0,2 Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HRC)	Etki Enerjisi (ft-lb)
A	1034.3	758.5	10	-	-
H900	1379.0	1275.5	14	44	15
H925	1310.1	1206.6	14	42	15
H1025	1172.2	1137.7	15	38	35
H1075	1137.7	1034.3	16	36	40
H1150	998.8	861.9	19	33	50

Murr çalışmasında, hızlı katılaşmış Co-baz veya Ni-baz süper alaşım tozlarında sıkça rastlanan dendritik yapıları detaylı bir şekilde incelemiş ve Elektron Işını Ergitme (EBM) ile

Seçici Lazer Ergitme (SLM) sistemleri arasında karşılaştırmalar yapmıştır. Hem EBM hem de SLM sistemlerinde ışın tarama hızı, boyutu ve aralığı gibi parametreler ayarlanabilir, bu sayede eriyik tarama işleminin hassasiyeti ve sonuçta oluşan malzemenin mikroyapısal özellikleri kontrol edilebilmektedir. Araştırma, Ti-6Al-4V alaşımının EBM ve SLM yöntemleri kullanılarak üretiminin yanı sıra, bu sistemlerin malzeme özelliklerine ve potansiyel uygulama alanlarına olan etkilerini de ele almıştır. Işın tarama parametrelerinin, her iki sistemde de malzeme özelliklerini etkileme kapasitesine sahip olduğu vurgulanarak, bu ayarlamaların malzeme performansının optimize edilmesinde kritik öneme sahip olduğu vurgulanmıştır [27].



Şekil 2.22. EBM (a) ve SLM (b) sistem şemaları. Atomize Cu tozu örneği; SEM görüntüsü (c) [27]

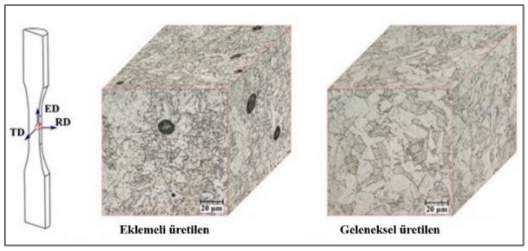
Murr'un yaptığı başka bir çalışma, Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemini kullanarak 17-4 PH paslanmaz çeliğin imalat sürecini ve bu süreçte elde edilen bileşenlerin mikroyapısal ve mekanik özellikleri üzerine odaklanmıştır. Araştırma aşamasında farklı krom, nikel, bakır, molibden, silikon, manganez, niyobyum ve demir bileşenlerine sahip gaz atomize edilmiş 17-4 PH paslanmaz çelik tozları tercih edilmiştir. Mikroyapı analizi, üretilen numunelerin imalat yönüne paralel bir çıta yapısına sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, bileşenlerin sertlik değerlerinin, kullanılan toz bileşimi ve uygulanan ısıl işlem koşullarına göre değişiklik gösterdiği belirlenmiştir [28].

Çizelge 2.29. SLM 17-4 PH birincil ürün aşaması [28]

Toz tipi	Argon Gazı İmalatı	Nitrojen Gazı İmalatı
Argon atomize edilmiş (α)	α (bcc-martensite) (Ar/Ar)	α (bcc-martensite) (Ar/N_2)
Argon atomize edilmiş (γ)	α (bcc-martensite) (N_2/Ar)	γ (fcc-austenite) (N_2/N_2)

Luiz Carneiro vd., gerçekleştirdikleri çalışmada geleneksel üretim ve eklemeli imalat teknikleri kullanılarak üretilen 17-4 PH paslanmaz çeliğin mikroyapısal özelliklerini

karşılaştırmışlardır. Geleneksel üretim ile üretilen numunelerde tüm düzlemlerde homojen bir matris yapısı sergilendiğini, buna karşın eklemeli imalat numunelerinde daha derin bir etkilenme ve daha belirsiz östenit sınırları gözlemlendiğini ortaya koymuşlardır. Faz analizi sonuçları hem eklemeli hem de geleneksel imalat koşulları altında östenit faz oranının yaklaşık %21 civarında olduğunu göstermiştir. Eklemeli imalat ile üretilen malzemelerin genellikle geleneksel üretim metodlarıyla üretilenlere göre daha düşük süneklik ve yorulma dayanımı sergilediği bildirilmiştir. Eklemeli imalat numunelerinde görülen mekanik özelliklerin, üretim yöntemi sırasında belirli yapı yönü, ardından gerçekleştirilen ısıl işlemler ve üretim sürecinde kullanılan atmosfer gibi çeşitli faktörlerden etkilendiği vurgulamışlardır [29].



Şekil 2.23. Eİ ve Gİ 17-4 PH paslanmaz çeliklerin üç boyutlu stereografik mikroyapısı [29]

Çizelge 2.30. Eİ 17-4 PH paslanmaz çeliğin yorulma sonuçları [29]

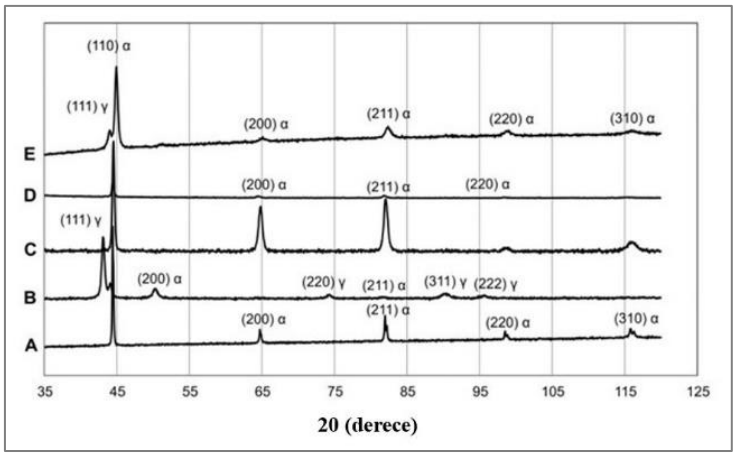
Numune	$\Delta\varepsilon/2$ (%)	$\Delta_{\varepsilon p2}$ (%)	$\Delta\sigma/2$ (MPa)	N_f (döngüler)
AM11	1.00	0.47	1059.8	129
AM12	0.85	0.33	1013.5	218
AM10	0.79	0.19	1014.6	633
AM13	0.60	0.04	992.0	1,346
AM05	0.50	0.04	920.7	4,100
AM26	0.45	0.02	837.0	7,345
AM03	0.40	0.02	791.6	11,271
AM16	0.36	0.03	703.3	83,254
AM25	0.30	0.03	659.3	27,987
AM04	0.30	0.00	600.3	37,014
AM01	0.20	0.01	500.2	56,918
AM21	0.15	0.01	443.0	56,258
AM22	0.10	0.00	406.1	75,081
AM15	0.06	0.00	374.6	119,754
AM14	0.05	0.01	393.8	260,214
AM29	0.10	0.00	370.5	156,219
AM05	0.05	0.01	329.5	449,836
AM27	0.15	0.03	303.3	435,168
AM24	0.00	0.01	319.5	947,059
AM18	0.15	0.15	299.1	>1,000,821

T.M. Mower ve M.J. Long, eklemeli imalat yöntemi kullanılarak üretilen malzemelerin mekanik davranışlarını analiz etmek için kapsamlı bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmalarında iki ana metal grubuna yoğunlaşmışlardır: "hafif metaller" olarak tanımlanan AlSi10Mg alüminyum alaşımı ve Ti6Al4V titanyum alaşımı ile "paslanmaz çelikler" grubunda yer alan 316L ve 17-4PH alaşımları. Bu malzemelerin çekme mukavemeti, gerilme-gerinim davranışları ve bükülme ve yorulma dayanıklılığı gibi mekanik özelliklerinin test etmişlerdir. Çalışma sonucu Çizelge 2.31'de verilmiştir [30].

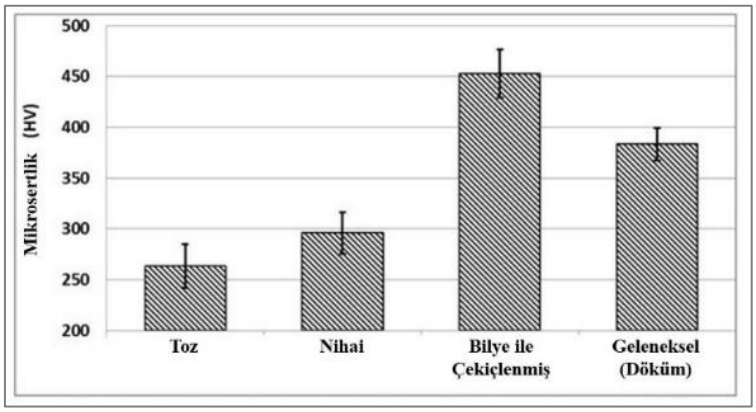
Çizelge 2.31. Üretilen malzemelerin mekanik test sonuçları [30]

Malzeme	Oryantasyon	Modül (GPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Maks. Çekme Dayanımı (MPa)	Hata Gerilimi
Al6061 (Dövme)	Uzunlamasına	66.5	293	310	~0.15
AlSi10Mg (SLM)	Yatay	65.5	227	358	0.039
	Dikey	75.4	172	289	0.026
Ti6Al4V (Dövme)	Uzunlamasına	113.1	945	979	0.010
Ti6Al4V (DMLS)	Yatay	108.8	972	1034	0.055
	Dikey	105.9	862	930	0.055
	Yatay & Dikey	111.7	862	1131	~0.24
316L (HIP) (Dövme)	Uzunlamasına	187	345	517	0.28
316L (DMLS)	45° Eğimli	193	473	680	0.29
17-4 PH (Dövme)	Uzunlamasına	148	889	1072	0.025
17-4 PH (DMLS)	Yatay	176	839	1085	0.025
	45° Eğimli	162	737	914	0.086

AlMangour, B. ve J.-M. Yang'ın çalışmalarında, Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) yöntemi kullanılarak üretilen 17-4 PH paslanmaz çelik bileşenler üzerinde yoğunlaşmış ve eklemeli imalat sonrası bilyeleme ile yüzey işlemi uygulamışlardır. Alüminyum oksit kumlama ve cam boncuklu bilyeleme gibi iki aşamalı yüzey işlemi ile numunelerin yüzey pürüzlülüğünü bir beyaz ışık interferometresi ile ölçmüş ve SEM kullanılarak detaylı bir mikroyapısal karakterizasyon gerçekleştirmişlerdir. Araştırmalar, söz konusu yüzey işlemlerinin yüzey kalitesini ve mekanik performans özelliklerini iyileştirme noktasında etkin olduğunu ve düşük yüzey pürüzlülüğü ile gelişmiş mekanik özellikler arasındaki bir bağlam olduğunu ortaya çıkarmıştır [31].



Şekil 2.24. 17-4 paslanmaz çeliğin XRD profilleri: (a) toz, (b) nihai, (c) geleneksel döküm malzeme, (d) bilyelenmiş yüzey, (e) bilyelenmiş numunenin enine kesiti [31]



Şekil 2.25. DMLS ile üretilen 17-4 paslanmaz çeliğin mikrosertlik değerlerindeki değişim [31]

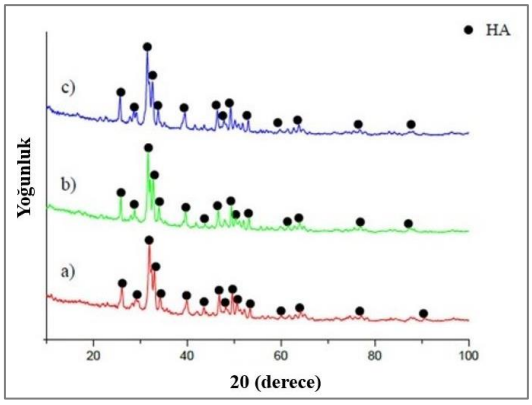
2.2. Paslanmaz Çeliklere Uygulanan Isıl İşlemler

Cory Dian Alfarisi vd. yaptığı çalışmada, 316L paslanmaz çelik substratlar üzerine uygulanan hidroksiapatit (HA) kaplamaların mekanik aderans özelliklerini optimize etmek için farklı ısıl işlem sıcaklıkları ve nitrik asit konsantrasyonlarının etkilerine odaklanmışladır. Araştırma sonuçları, nitrik asit oranı %20 ve ısıl işlem sıcaklığı 500 °C olduğunda HA kaplamaların en yüksek kesme mukavemeti değerine, 55.030 MPa olarak ulaştığını göstermektedir. Bu artış, asit etching işlemi ile yüzey pürüzlülüğünün artmasına bağlanmıştır. X-ışını kırınımı (XRD) analizleri, HA kaplamaların kristalliğini onaylamakta olup, daha düşük nitrik asit konsantrasyonlarının daha yüksek kristallik dereceleri ile korrele olduğunu ortaya koymuştur. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi ise HA partiküllerinin homojen bir şekilde dağıldığını ve paslanmaz çelik yüzeye iyi bir yapışma

sergilediğini belirtmiştir. Araştırma, 316L paslanmaz çelik üzerine yapılan HA kaplamalarının biyomedikal implant uygulamalarında kullanım için gerekli nitelikleri taşıdığını göstermektedir [32].

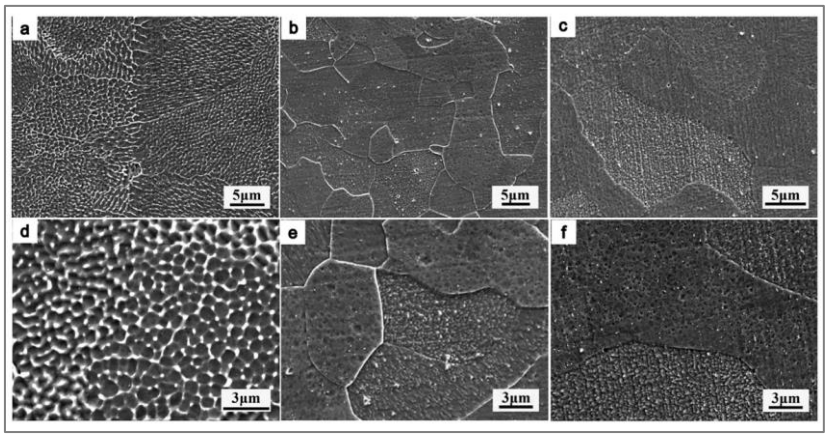
Çizelge 2.32. Isıl işlem sıcaklığı ve nitrik asit konsantrasyonunun HA tabakasının kristallenmesi üzerindeki etkisi [32]

HNO_3 (%)	Isıl İşlem (°C)	Kristalleşme (%)
10	500	97.74
20	500	96
20	700	95.97



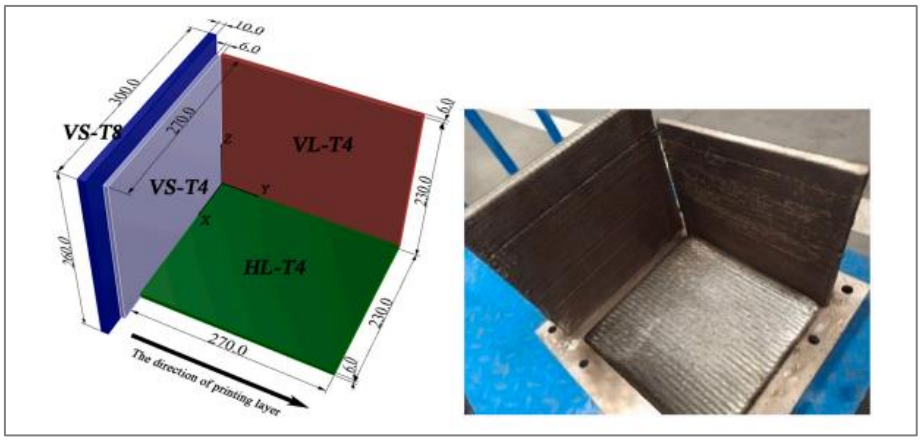
Şekil 2.26. (a) Isıl işlemde kaplanmış numunelerin XRD grafiği 500 °C, HNO3 %10; (b) Isıl işlem 500 °C, HNO3 %20; (c) Isıl işlem 700 C, HNO3 %20 [32]

Zhen Zhang ve ekibi, Seçici Lazer Ergitme (SLM) teknolojisi kullanarak üretilen ve çeşitli ısıl işlemlere tabi tutulan 316L paslanmaz çelik numunelerin mikroyapı ve elektrokimyasal özellikleri üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, farklı işleme tabi tutulan numunelere 'HT950' ve 'HT1100' ısıl işlemlerini uygulamışlardır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analiziyle, nihai numunenin hücresel mikro yapısının ısıl işlem sonrasında östenitik yapıya dönüştüğü gözlemlenmiş ve manganez silikat ve MnS gibi metalik olmayan inklüzyonların tespit edildiği işaret edilmiştir. Korozyon davranışını anlamak amacıyla potansiyodinamik polarizasyon deneyleri yürütülmüş ve bulgular, ısıl işlem görmüş numunelerin, nihai numuneye kıyasla üstün korozyon direncine sahip olduğunu belirlemiştir. Elektrokimyasal gürültü (EN) deneyleri ile lokal korozyon davranışı üzerine ek analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen EN verileri, ısıl işlem görmüş numunelerin nihai numunelerden daha düşük akım gürültüsü seviyelerine sahip olduğunu belirlemişlerdir [33].



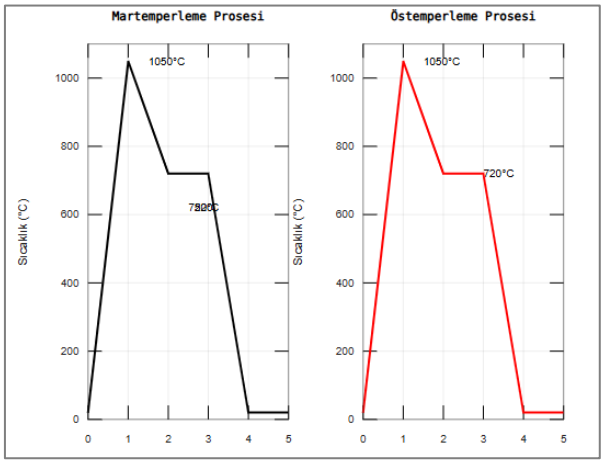
Şekil 2.27. Aşındırılmış numune yüzeylerinin SEM morfolojisi, (a) ve (d) nihai (b) ve (e) HT950, (c) ve (f) HT1100 [33]

Yang Zhao vd. gerçekleştirdiği çalışma, Tel ve Ark Katmanlı İmalat (WAAM) yöntemiyle üretilen östenitik paslanmaz çeliklerin mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerine araştırma yapmışlardır. Araştırma kapsamında, mekanik özelliklerle mikroyapılar arasındaki ilişki, ısıl işlemlerin etkileri ve farklı çıkartma stratejilerinin katmanlı imalatta nasıl etkilere yol açtığı incelenmiştir. Deneyler, Soğuk Metal Transfer (CMT) teknolojisi kullanan WAAM metodolojisiyle üretilen çökeltme plakaları üzerinde yürütülmüş ve bu plakaların kaynak torchunun Y yönünde ileri-geri hareket ettirilmesiyle oluşturulmuştur. Her bir plakanın üretimi sırasında torchun takip ettiği yolu kaydetmiş, ardından tel erozyon ile bu plakalardan çekme testleri için numuneler üretmişlerdir. Çekme numuneleri, biriktirme plakalarının üç farklı yönünden alınarak, her bir yön için üç numune hazırlanmış ve toplam dokuz numune mekanik testlere uygulamışlardır. Gerilme testleri ve metalografik analizler sonucunda, akma ve çekme dayanımları ilgili standartlara uygun olan ve farklı ısı girdisine bağlı tane boyutu varyasyonları sergileyen ostenitik mikroyapıya sahip numunelerin sünek ve kırılgan kırılma karakteristiği gösterdiği, anizotropiye sahip bazı plakaların ise 45° örnek alma yönünde farklı mekanik özellikler sergilediği ve çözelti ısıl işleminin akma ve çekme dayanımında düşüşe sebep olup kırılma deformasyonunu artırdığı gözlemlenmiştir [34].



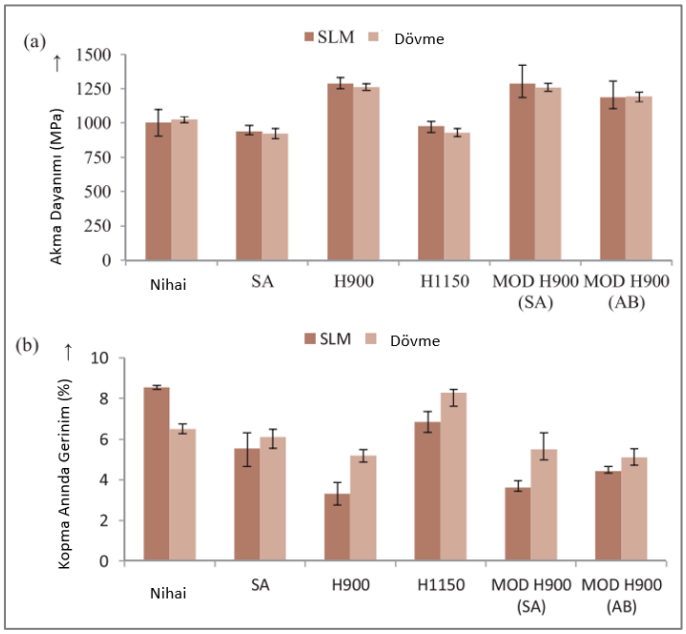
Şekil 2.28. Çökeltme plakaları dijital (sol) ve gerçek (sağ) [44]

Chien-Te Huang vd., farklı ısıl işlem protokolleri uygulanan martemperlenmiş 631 paslanmaz çelik numunelerin mikroyapısında ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişiklikleri incelemişlerdir. Numuneler, özel belirlenen sıcaklık ve süreler dahilinde martemperleme işlemine tabi tutulmuş, sonrasında soğutma ve temperleme işlemleri uygulanmıştır. Numunelerin mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi için Rockwell sertlik testi, çekme mukavemeti testi ve darbe testi gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın bulguları, martemperleme sürecinin paslanmaz çeliğin mikroyapısında ve mekanik davranışlarında belirgin değişiklikler yarattığını göstermiştir. Malzemenin sertliği ve çekme mukavemetinin arttığı, fakat uniform ve toplam uzamada önemli bir azalma gözlemlenmediği belirtilmiştir. En optimize çekme özelliklerine sahip numunenin, 720 °C sıcaklıkta 4 saat süreyle martemperleme işlemi uygulanan numune olduğu tespit edilmiş ve bu numunenin mikroyapısında östenit, martenzit ve ferrit fazlarının varlığı belirlenmiştir [35].



Şekil 2.29. Öztemperleme ve martemperleme prosesi için akış şemaları [35]

Sagar Sarkar vd. yapmış olduğu çalışmada, ısıl işlem ve yaşlandırma uygulanmış çökelme sertleştirilebilir paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri üzerine odaklanmışlardır. Çalışmaları sırasında, bu malzemelerin mekanik performansındaki iyileştirmenin, yaşlandırma sürecinde oluşan Cu bakımından zengin çökeltiler ve bu çökeltilerin aşırı yaşlandırmada kabalaşma eğilimi göstermesiyle ilişkili olduğunu göstermişlerdir. Bunun yanında, araştırmacılar uygun ısıl işlem protokollerinin uygulanabilmesi ile mekanik özelliklerde gözlenen anizotropinin azaltılabileceğine göstermişlerdir [36].



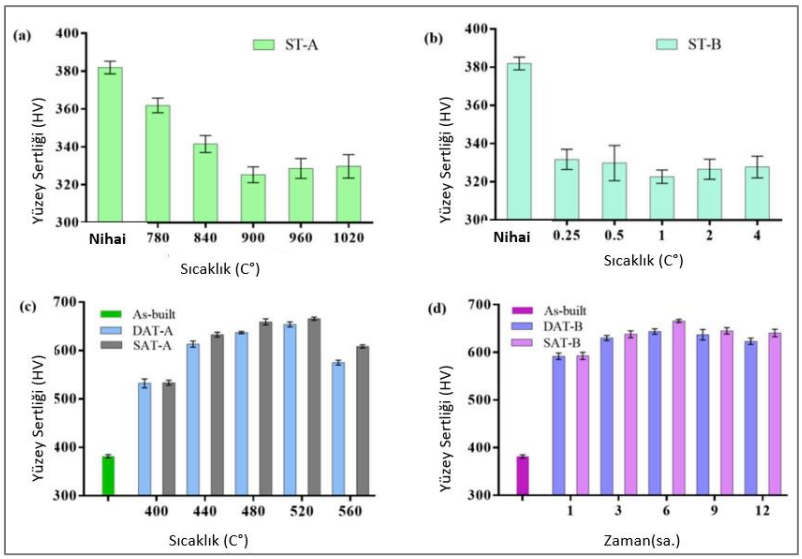
Şekil 2.30. (a) Isıl işlem görmüş dikey yapılı SLM ve dövme 15-5 PH için ortalama akma dayanımı, (b) kopma anındaki çekme gerilmesi [36]

Bai ve arkadaşları, maraging çelik malzemeden Seçici Lazer Ergitme (SLM) işlemi kullanarak üretilen numunelerin mikroyapısal özellikleri, faz kompozisyonları, mikrosertlikleri, çekme mukavemetleri ve darbe toklukları üzerine kapsamlı bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışma kapsamında, mikroyapısal incelemeler için kare kesitli numuneler; çekme testleri için standartlara uygun çekme numuneleri ve darbe tokluk testleri için darbe numuneleri üretmişlerdir. Elde edilen numunelerin ısıl işlemi, oksidasyonu engellemek amacıyla argon atmosferi altında kutu tipi bir fırında gerçekleştirilerek, SLM işleminden kaynaklanan ve geleneksel yöntemlerle farklılık gösteren mikroyapıyı dikkate alacak şekilde özel olarak tasarlanmıştır. Bai vd. tarafından yapılan analizler, SLM işlemi sonrası elde edilen numunelerin eriyik havuz sınırları, şerit benzeri yapılar ve hücresel yapılar gibi karakteristik mikroyapı özelliklerine sahip olduğunu belirlemişlerdir. Uygulanan ısıl işlem

prosedürlerinin, mikroyapı üzerinde önemli değişikliklere yol açtığı ve söz konusu mikroyapısal özelliklerin ısıl işlem süreci boyunca kademeli olarak kaybolduğu gözlemlenmiştir. İşlem gören numunelerin mikroyapısının işlem sıcaklığına ve bekletme sürelerine bağlı olarak değiştiği ve farklı mikroyapısal morfolojilerin ortaya çıktığı saptanmıştır. Araştırma sonuçları, SLM işlemiyle üretilen maraging çeliklerde ısıl işlemin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerinde kritik bir rol oynadığını göstermişlerdir [37].

Çizelge 2.33. SLM sürecine dayalı maraging çeliğinin ısıl işlem şeması [37]

Deney No	ST Sıcaklık (°C)	ST Tutma süresi (sa)	DAT Sıcaklık (°C)	DAT Tutma süresi (sa)	SAT Sıcaklık (°C)	SAT Tutma süresi (sa)	Isıtma oranı (°C/dak)
1	780	1	400	6	900 + 400	6	10
2	840	1	440	6	900 + 440	6	10
3	900	1	480	6	900 + 480	6	10
4	960	1	520	6	900 + 520	6	10
5	1020	1	560	6	900 + 560	6	10



Şekil 2.31. Farklı ısıl işlemlerde maraging çeliğinin mikro-Vickers sertliği: (a) (b) ST; (c) (d) DAT ve SAT [37]

Sathyanath, A. ve A. Meena'nın yürüttüğü çalışmada, 17-4 PH paslanmaz çeliğin mekanik deformasyon davranışları ve bu süreçteki şekil değiştirme sertleşmesinin karakteristiklerini incelemişlerdir. Malzemenin mikroyapısal evrimi, detaylı bir şekilde taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve transmisyon elektron mikroskobu (TEM) yöntemleri ile incelenmiştir. Gerçekleştirilen çekme ve basma testleri ile elde edilen bulguların yanı sıra, ölçülen sertlik değerleri alınmıştır. Maksimum sertlik ve mukavemet değerleri 1250 MPa maksimum

çekme, 1150 MPa akma dayanımı ile H900 ısıl işlem koşulunda elde edilmiştir. Ayrıca, akma oranı (akma/çekme mukavemeti) H1025 durumunda (0,96) artmış ve H900 yaşlandırılmış (0,87) ile H1150 (0,83) koşullarına kıyasla benzerdir olduğu belirlemişlerdir [38].

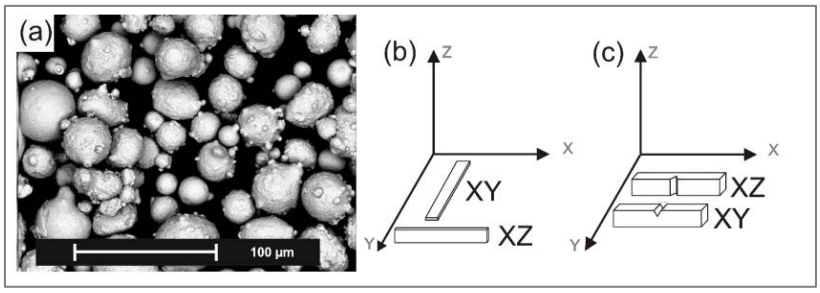
Çizelge 2.34. Isıl işlem koşulları [38]

Koşul	Isıl İşlem Prosedürü
Yapıldığı Gibi (AR)	Az tavlanmış
H900	Çözelti işleme + 480 °C'de yaşlandırma
H1025	Çözelti işleme + 520 °C'de yaşlandırma
H1150	Çözelti işleme + 620 °C'de yaşlandırma



Şekil 2.32. Alındığı gibi ve ısıl işlem görmüş koşullarda kırılmış yüzeyler [38]

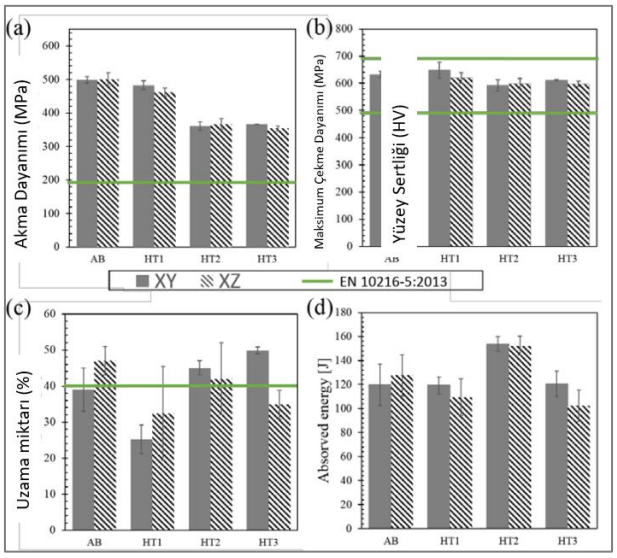
Montero vd., elektron geri saçılımlı kırınım (EBSD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) tekniklerini kullanarak, 316L paslanmaz çelik tozunun kristalografik yönelimi ve mikro yapısal evrimini derinlemesine incelemişlerdir. Seçici Lazer Ergitme (SLM) metoduyla üretimi gerçekleştirilen numuneler çeşitli ısıl işlemler uygulamışlardır. Numuneler, SEM ve EBSD analizleriyle detaylandırılmış olup, as-build (AB) ve HT1 koşullarının hücresel-dendritik mikroyapılarını, HT2 ve HT3 durumlarının ise çözülmüş eriyik havuzu sınırlarını ve hücresel dendritlerin yokluğunu göstermiştir. Vickers mikrosertlik testleri, AB ve HT1 koşullarının HT2 ve HT3'e göre anlamlı derecede daha yüksek sertlik değerleri bulunmuştur. 316L paslanmaz çeliğin SLM işlemi sonucunda, dövme yöntemine göre yüksek mukavemet ve uzama değerlerine ulaştığını, özellikle 950°C'de gerçekleştirilen ısıl işlemin (HT2), mukavemet ve tokluk anlamında üstün olduğunu belirlemişlerdir [39].



Şekil 2.33. 316L paslanmaz çelik toz morfolojisi (a). Çekme (b) ve Charpy (c) testi için parça konumlandırma [39]

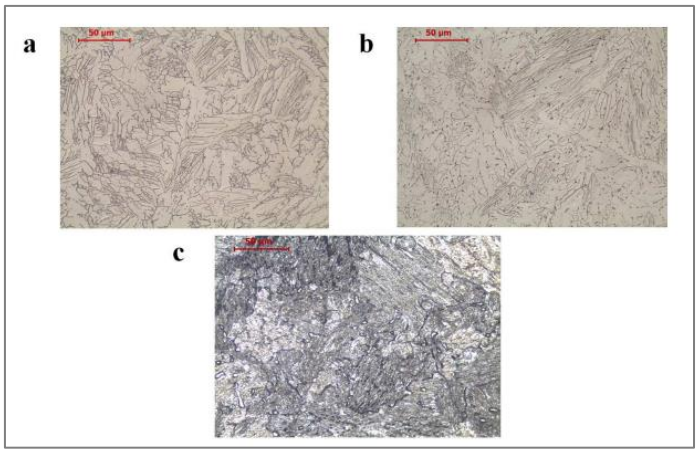
Çizelge 2.35. 316L çekme ve Charpy numunelerine uygulanan ısıl işlemler [39]

Isıl İşlem (HT)	Proses
HT1	600 °C'de 2 sa., hava soğutma
HT2	950 °C'de 2 sa., hava soğutma
HT3	1095 °C'de 2sa., su soğutma



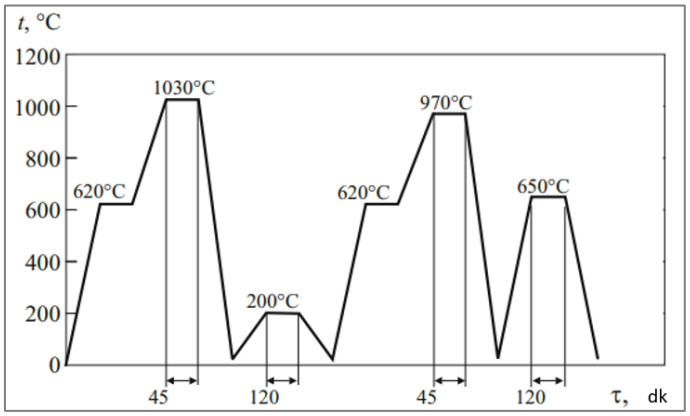
Şekil 2.34. 316L'nin as-built ve ısıl işlem koşullarında (HT1, HT2, HT3) mekanik özellikleri ve EN 10216-5:2013 standardı ile karşılaştırılması [39]

Ziewiec, A., Witkowska, M., ve Zielińska-Lipiec A. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 17-7 PH paslanmaz çeliğin kaynak bölgelerine ait mikroyapı ve doku gelişimi araştırmışlardır. Farklı yaşlandırma sıcaklıklarının kaynakların sertlik değerlerine etkisi incelenmiş ve 620°C'ye kadar olan sıcaklık artışının sertlikte bir yükselme ile ilişkili olduğu tespit etmişlerdir. Çalışma, kaynak mikroyapılarının, östenit ve delta ferritten oluştuğunu ve bu farklı fazların çeşitli morfolojiler sergilediğini göstermiştir [40].



Şekil 2.35. 17-7 PH kaynaklarının mikroyapıları: (a) kaynaklanmış durumdaki mikroyapı, (b) kaynaklanmış durumdaki mikroyapı ve ardından 465 °C/1 saat yaşlandırma, (c) 760 °C/1 saat tavlama ve ardından 620 °C/1 saat yaşlandırma sonrası mikroyapı [40]

Amini, K., Hoda, M.R., ve Shafyei, A. tarafından yürütülen çalışmada, DIN 1.4057 standartındaki martenzitik paslanmaz çeliğin mekanik özelliklerinin ve mikroyapısını incelemişlerdir. Östenit tanelerinin incelmesinin, SA1 numunesinin darbe enerjisi değerini SA2 numunesine kıyasla artırdığı gözlemlenmiştir. DA numunesi, SA1 numunesine kıyasla, %84'lük bir darbe enerjisi artışı ve %2'lik bir nihai kopma mukavemeti artışı sergileyerek, en iyi mukavemet ve darbe dayanıklılığı kombinasyonunu oluşturduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, temperleme sıcaklığının çeliğin sertliği ve darbe enerjisi üzerindeki etkisi incelenmiştir. 250-350°C aralığında martenzitik yapıdaki azalan tetragonal simetri sebebiyle sertlik düşüşü yaşandığını; 350-420°C sıcaklık aralığında ise karbür ayrışmasına bağlı olarak ikincil bir sertleşme süreci oluştuğunu gözlemlenmiştir [41].

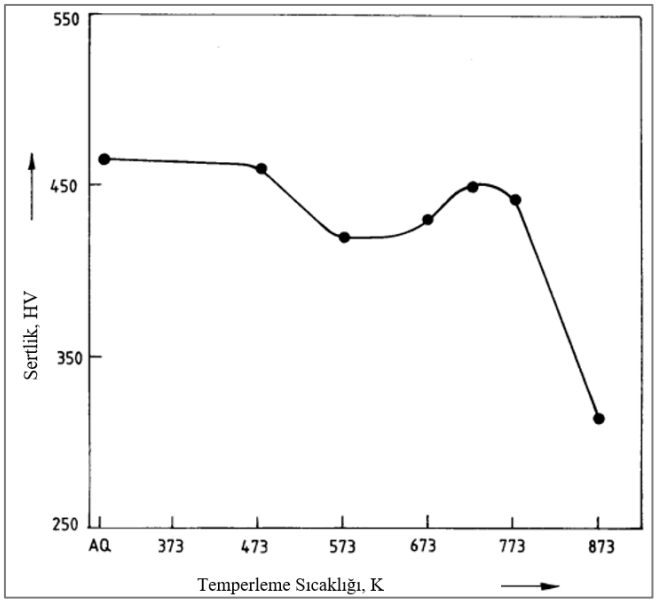


Şekil 2.36. DIN 1.4057 paslanmaz çeliğin çift östenitleştirme diyagramı [41]

Çizelge 2.36. DIN 1.4057 paslanmaz çeliğin sertliği (HB), Nihai kopma dayanımı (**σ**r) ve darbe enerjisi [41]

Numune	HB, kgf/mm²	σ_r, MPa	U_{im}, J
SA1	280	901	44
SA2	285	908	34
DA	295	912	81

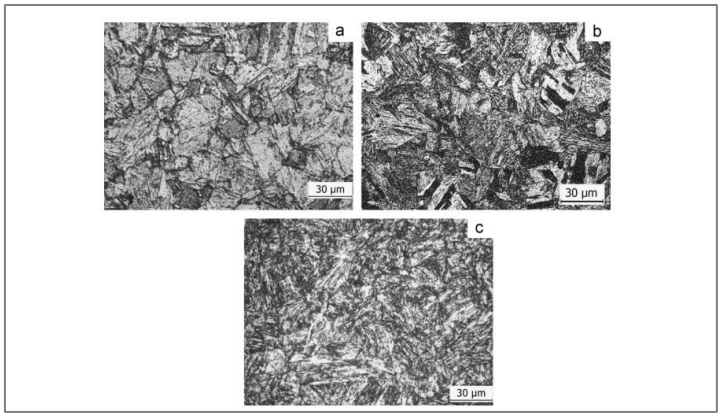
Balan, K.P., Venugopal Reddy, A., ve Sarma, D.S., gerçekleştirdikleri çalışmada, vakum indüksiyon ergitme yöntemiyle üretilmiş deneysel çeliklerin ve bunları izleyen ısıl işlem süreçlerinin karakterizasyonunu incelemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda, çeliğin sertliği düşük temperleme sıcaklıklarında azalma gösterirken, daha yüksek sıcaklıklarda ikincil sertleşme meydana geldiği gözlemlenmiştir. XRD analizleri temperleme sıcaklığının östenit içeriği üzerindeki etkilerini detaylandırmış, bu değişiklikler mikroyapısal seviyede incelenmiştir. Özellikle tavlama işlemi sırasında, ince östenit partiküllerinin çökelti olarak oluşumunun, çelikte tespit edilen ikincil sertleşmenin başlıca sebebi olduğunu belirlenmiştir [42].



Şekil 2.37. Artan temperleme sıcaklığı ile sertlikteki değişim [42]

Bhambroo vd. yürüttüğü çalışmada, 17-4 PH paslanmaz çeliğe uygulanan yaşlandırma işlemi süresince geri dönüşümlü östenit fazının oluşumu ve karakterize edilmesi üzerine çalışmışlardır. Özellikle, kritik elementler olan bakır (Cu), nikel (Ni) ve karbonun yerel segregasyonunun, östenitleşme sıcaklığını düşürdüğü ve oda sıcaklığında geri dönüşümlü

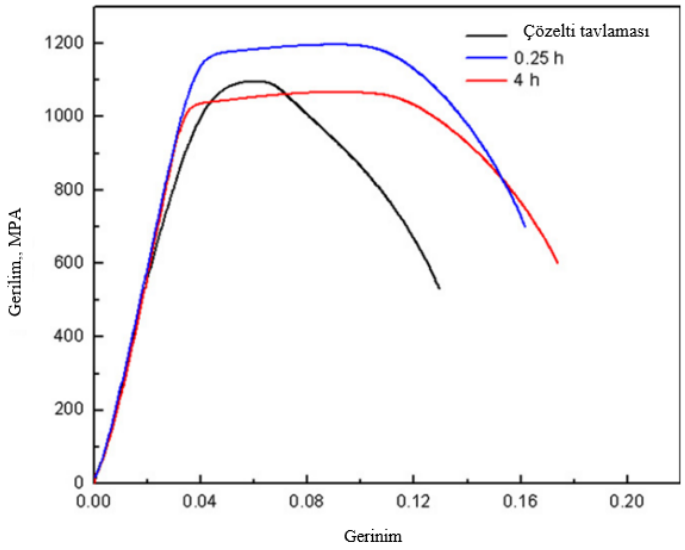
östenit fazının stabilizasyonuna sebebiyet verdiği bulgularını gözlemlemişlerdir. Farklı ısıl işlem süresi ve sıcaklıklarda malzemenin mikroyapısı ve özellikleri yaygın olarak araştırılmaktadır. Sıcaklık 580°C'de sabit tutularak, 15 ve 30 dakika, 1 ve 4 saat sürelerde malzemeye yapılan ısıl işlemin mikroyapıda östenitleşme sıcaklığını düşürdüğü, çekme ve darbe tokluğunda da azalmaya neden olduğu gözlemlenmiştir [43].



Şekil 2.38. Malzemenin farklı metalurjik koşullardaki optik mikrografları: (a) çözelti tavlaması, (b) 580 °C'de 0,25 saat yaşlandırma, (c) 580 °C'de 4 saat yaşlandırma [43]

580°C'de farklı sürelerde yaşlandırma sonrasında östenit içeriği

Zaman (sa.)	0	0.25	0.5	4
Östenit oranı (%)	0.2	1.8	3.3	3.8

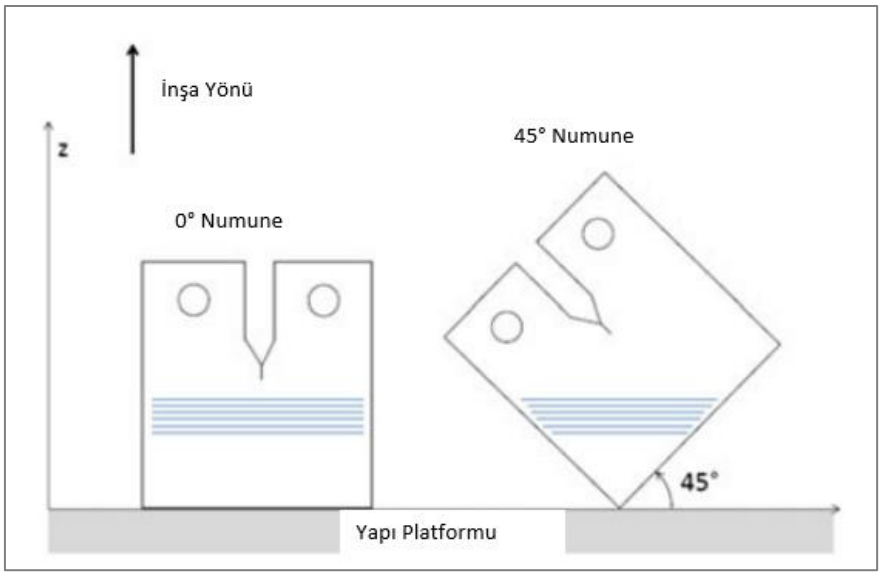


Şekil 2.39. Üç farklı koşulda malzeme için mühendislik gerilme-gerinim eğrisi, tavlanmış, 580 °C'de 0,25 ve 4 saat yaşlandırılmış [43]

Çizelge 2.37. Farklı yaşlandırma koşullarında malzemenin oda sıcaklığındaki darbe tokluğu [43]

Isıl işlem süresi (sa.)	Darbe Tokluğu (J)
0	192 ± 1
0.25	126 ± 4
0.5	151 ± 5
1	151 ± 4
4	155 ± 5

Fergani ve diğerleri, Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen ve iyi kaynak özellikleri ile tanınan 316L paslanmaz çeliğin karakteristiklerini ve potansiyel uygulamalarını derinlemesine incelemişlerdir. SLM ile üretilen 316L, belirgin ergime havuz sınırlarına ve anizotropik tane yapısına sahip olması nedeniyle geleneksel yöntemlerle üretilen 316L paslanmaz çelikten farklı özellikler sergilemektedir. Uygulanan farklı sıcaklıklardaki ısıl işlemlerin, malzemenin faz yapısında ve tane büyüklüğünde değişikliklere yol açtığı gözlemlemişlerdir. SLM teknolojisi ile üretilen 316L, yüzey pürüzlülüğünün etkisiyle çatlak kapanmasının olmaması ve çatlak uçlarında daha düşük plastisite sebebiyle, geleneksel yöntemlerle üretilen 316L'ye nazaran belirgin bir şekilde azalmış çatlak dayanımını ortaya koymuştur. Kalıntı gerilmelerin, SLM 316L'nin yorulma çatlak ilerleme karakteristiği üzerinde sınırlı etkisi olurken, taranma stratejisi ve katman hızının bu davranışı etkileyebileceğini gözlemlemişlerdir [44].



Şekil 2.40. 0° ve 45° yapı yönelimleri ile katman sınırları mavi ile gösterilmiştir [44]

Çizelge 2.38. Ön kırılma sonra ölçülen kırık uzunluğu [44]

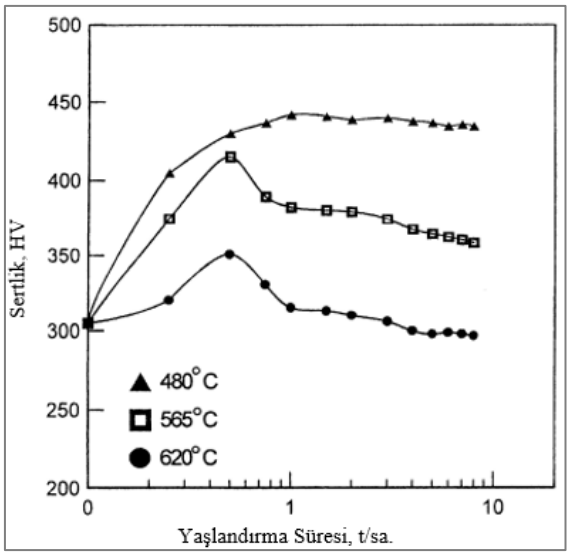
	Numune	Ortalama Ön kırık uzunluğu (mm)	Ön-Arka Farklılığı (mm)
0° Nihai (AB)	1	1.27	0.56
	2	1.30	0.50
45° Nihai (AB)	1	1.44	0.33
	2	1.69	0.15
0° HT650 FC	1	1.35	0.31
	2	1.19	0.27
0° HT1050 FC	1	1.12	0.19
	2	1.45	0.21
45° HT1050 FC	1	1.48	0.26
	2	1.48	0.26
0° HT1050 WQ	1	1.27	0.20
	2	1.63	0.00
45° HT1050 WQ	1	3.88	1.22
	2	1.24	0.55

Habibi Bajguirani vd., 15-5 PH paslanmaz çeliğin mikroyapısal özelliklerini incelemişlerdir. Analiz öncesi numuneler, argon gazı atmosferinde çözeltiye alma işleminden geçirilip suyla hızlıca soğutulmuştur. Mikroyapısal inceleme ve mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi amacıyla, silindirik deneysel numuneler üzerinde çekme testleri uygulanmış ve kırık yüzeylerde SEM kullanılarak analizler gerçekleştirmişlerdir. 500°C, 550°C, 600°C, 650°C ve 700°C ısıl işlem sıcaklığı ve 2, 32 ve 64 saat sürelerinde yaşlandırılan ve su ile soğutulan 15-5 PH paslanmaz çeliğin çekme testleri ve mikroyapısı incelenmiş, en yüksek dayanımı 500°C sıcaklıkta ve 2 saat ısıl işlem süresinde elde edilmiştir. Ayrıca 15-5 PH paslanmaz çeliğinin suyla soğutulmuş durumdaki mikroyapısı, yüksek dislokasyon yoğunluğuna sahip iğne martensit yapı sergilediği ve martensit lamelleri içinde Nb karbürleri ve Cr7C3 karbürlerinin oluştuğu gözlemlenmiştir [45].

Çizelge 2.39. 15-5 PH çeliğinin çeşitli yaşlandırma işlemlerinden sonra karşılık gelen mekanik özellikleri [45]

Koşul	AD (MPa)	MÇD (MPa)	Uzama %	RA %
Nihai	808	1044	17.5	49.5
Tavlanmış	874.5	982.5	17	50
500°C/2 Sa.	1150	1240	16	48
500°C/64 Sa.	1080	1097	17.5	49
550°C/2 Sa.	1043	1087	17.8	49
550°C/64 Sa.	942	986	17.5	49.5
600°C/32 Sa.	954	986	17	49.5
650°C/2 Sa.	637	906	18.7	47
650°C/64 Sa.	680	910	18.7	49.5
700°C/2 Sa.	681	928	17.1	49.5
700°C/32 Sa.	756	937	17	50
700°C/64 Sa.	751	937	14.9	51

Hsiao, C.N., Chiou, C.S. ve Yang, J.R. yaptıkları çalışmalarında, 17-4 PH paslanmaz çeliğin çözelti işlemi sonrasında ve yaşlandırılması sırasında meydana gelen yapısal ve mikro yapısal değişiklikleri incelemişlerdir. Çözelti işlemi, malzemenin 1040°C sıcaklığa 3 dakika süre ile ısıtılıp ardından sürekli bir soğutma işlemine tabi tutulmasını, yaşlandırma işlemi ise, numunelerin 480-620°C sıcaklık aralığındaki farklı zaman dilimlerinde belli bir süre tutulmasını kapsamıştır. Yaşlandırma işlemi, çökelme sertleşmesi ve bakır bazlı çökeltilerin ortaya çıkışına neden olurken, yaşlandırılan numunelerin mikroyapıları, martensit ve residual (kalıcı) östenitin bir karışımını ve çeşitli miktarlarda çökeltilerin varlığını göstermiştir. 480-620°C arasındaki sıcaklıklarda ve farklı zaman dilimlerinde ısıl işlem yapılan numunelerin sertliğinin yaşlandırma süresinin artmasıyla arttığı, bir dengeye ulaştığı ve daha fazla yaşlandıkça sertliğin azaldığı, bu durumun da aşırı yaşlandırmadan dolayı meydana geldiği gözlemlenmiştir [46].



Şekil 2.41. Yaşlandırma süresinin çözelti ile muamele edilmiş numunelerin sertliği üzerindeki etkisi [46]

Jin, Yang ve Yi, çalışmalarında paslanmaz çelik malzemenin mikroyapısı ve mekanik özelliklerini farklı ısıl işlem proseslerinin etkisi altında değerlendirmişlerdir. Bu prosesler yağ soğutma, hava soğutma ve temperlemeyi içermektedir. Araştırma sonuçları, hızlı soğutma işlemlerinin dayanıklılığı ve aşınma direncini arttırırken, yavaş soğutma proseslerinin kalıntı gerilimlerini azalttığını ve plastisitenin artışına katkı sağladığını ortaya koymuştur. Yağ soğutma, küçük tane boyutlarına sahip martenzit ve benit mikroyapıları oluştururken, temperlemeli yağ soğutmanın daha homojen tane boyutları ile mikroyapı geliştirdiği gözlenmiştir. Hava soğutma işlemi, ferit, benit ve minimal perlit içeren bir mikroyapı sağlarken, temperleme işlemi karbür taneciklerinin dağılımını iyileştirmiş ve tane boyutlarını artırmıştır. Paslanmaz çelik kaplamaların mekanik özellikleri akma dayanımı, çekme dayanımı, uzama ve etki enerjisiyle değerlendirilmiş, en yüksek kayma dayanımının 450°C'ye kadar yağ soğutulup ardından hava soğutulan numunelerde elde edildiği belirlenmiştir [47].

Çizelge 2.40. Numunelerin ısıl işlem detayları [47]

Proses	Sıcaklık (°C)	Tutma (dk)	Soğutma	Sıcaklık (°C)	Tutma (dk)	Soğutma
Sıcak haddeleme	-	-	Hava soğutma	-	-	-
Yağ soğutma	1000	60	Yağ soğutma	-	-	-
Yağ soğutma + temperleme	1000	60	Yağ soğutma	500	30	Hava soğutma
Yağ ve hava soğutma	1000	60	Yağ soğutma 450°C'de	-	-	Hava soğutma

Çizelge 2.41. Numunelere ait mekanik özellikler [47]

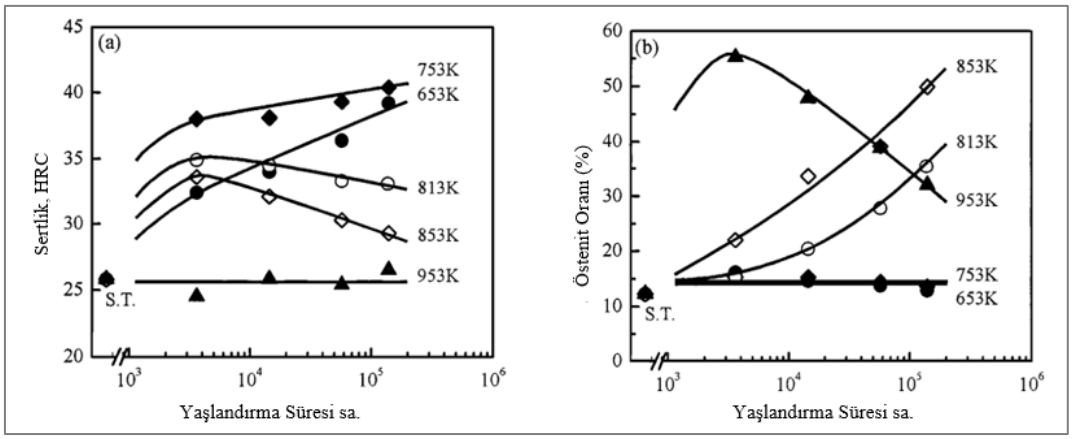
Numuneler	σ_c, MPa	σ_s, MPa	R_m, MPa	δ, MPa	W, J (0°C)
Sıcak haddeleme	402	320	511	32,4	55
Yağ soğutma	436	596	802	11,9	19
Yağ soğutma + temperleme	424	598	664	14,6	154
Yağ ve hava soğutma	446	364	558	22,2	146

Lebrun ve arkadaşları, Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemi kullanılarak üretilen 17-4 PH paslanmaz çeliğe ısıl işlem uygulayarak mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, SLM yöntemi sonucu ortaya çıkan mikroyapının detaylı incelenmesine ek olarak, mekanik dayanıklılığın artışı ve malzemede metastabil östenitin korunarak mekanik özelliklere olumlu etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Farklı yaşlandırma koşullarının mekanik davranış üzerindeki etkisinin anlaşılabilmesi için akma dayanımı, maksimum çekme dayanımı ve uzama gibi mekanik özellikler detaylı olarak değerlendirilmiş ve bu değerlendirme sonuçları Çizelge 43'te gösterilmiştir [48].

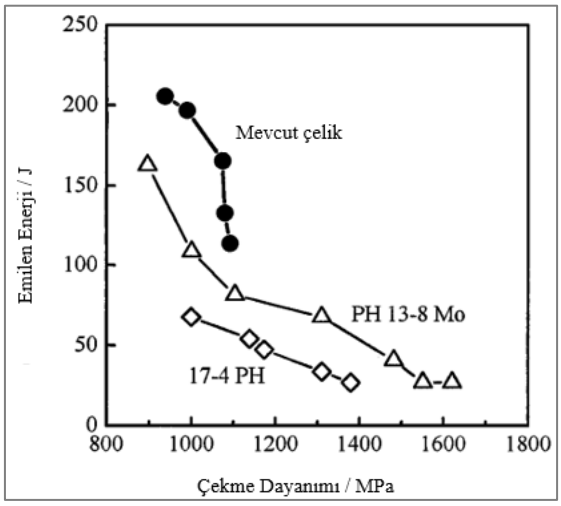
Çizelge 2.42. Özet mekanik özellikler [48]

Koşul	Sertlik (HMV)	0.2% Elastik Offset, MPa	MÇD, MPa	Uzama %	Toplam Uzama %
Nihai	333±2	661±24	1255±3	9,9±0,2	16,2±2,5
H900	375±3	945±12	1417±6	11,7±0,8	15,5±1,3
H1025	399±8	870±25	1358±8	6,5±0,03	13,3±1,5
H1150	381±3	1005±15	1319±2	4,8±0	11,1±0,4
Koşul A	330±3	939±9	1188±6	3,5±0,2	9±1,5
KA-H900	417±5	1352±18(1170)	1444±2(1310)	2,9±0,1	4,6±0,4(10)
KA-H1025	350±4	1121±9(1000)	1172±2(1070)	4,8±0,1	9,6±1,7(12)
KA-H1150	317±3	859±11(725)	1017±15(930)	7,7±0,3	16,6±1,2(16)

Nakagawa, Miyazaki ve Yokota'nın yaptıkları araştırmada, paslanmaz çelik numunelerin yaşlanma süresi ve sıcaklıklara bağlı olarak sertlikleri ve içerdikleri muhafaza edilmiş östenit miktarlarındaki değişiklikler incelemişlerdir. Sertlik genellikle artan yaşlanma süresiyle birlikte yükselmiş, ancak 953 K (680°C) sıcaklıkta sabit kalmıştır. 813 K (540°C) ve 853 K (580°C) sıcaklıkta sertlik ilk başta artmış ardından yaşlanma süresinin artmasıyla azalmıştır. Muhafaza edilmiş östenit miktarı da benzer bir trend izlemiş, 653 K (380°C) ve 753 K (480°C) sıcaklıklarda değişiklik göstermezken, 813 K ve 853 K'da kademeli olarak yükselmiş ve en fazla artış 953 K'da gözlemlenmiştir. Çalışma aynı zamanda martensitik fazda ikizlenmenin varlığını tespit etmiş, bu durumun çeliğin mekanik özelliklerini etkileyebileceği yönünde değerlendirmişlerdir [49].

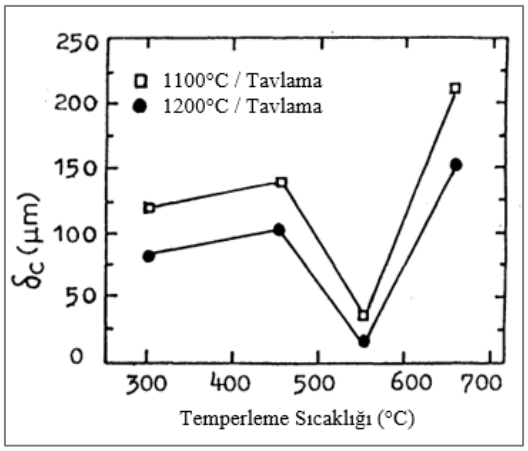


Şekil 2.42. Çeşitli sıcaklıklarda yaşlandırma süresi ile (a) sertlik ve (b) östenit miktarındaki değişimler [49]



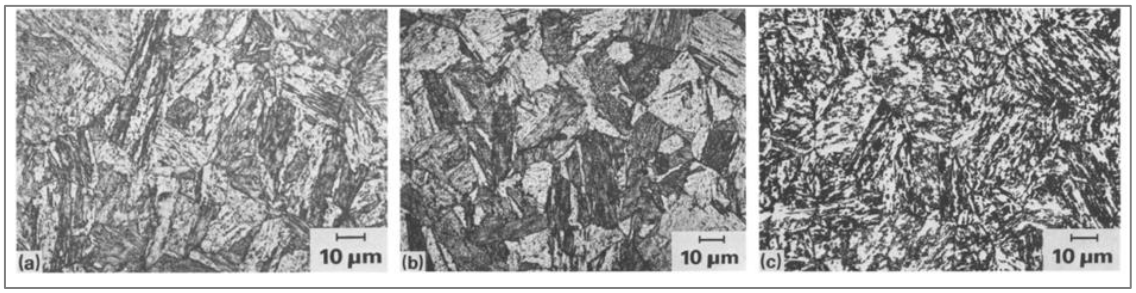
Şekil 2.43. PH 13-8 Mo ve 17-4 PH paslanmaz çelik ile mevcut çeliğin çekme dayanımı ve absorbe edilen enerji arasındaki ilişki [49]

Ning, Zhonggang ve Menggen'in yürüttükleri araştırmada, 17Cr-2Ni çeliğinin ısı işlemi sonrası mikroyapısındaki ve mekanik özelliklerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada farklı östenitleştirme sıcaklıklarının çekme dayanımı ve darbe dayanıklılığı gibi temel mekanik özellikler üzerine etkileri incelenmiştir. Araştırma sonuçları, malzemenin dayanıklılığının östenitleştirme sıcaklığına duyarlı olduğunu, buna karşın akma dayanımı, çekme dayanımı ve süneklik gibi diğer mekanik özelliklerin östenitleştirme sıcaklığından daha az etkilendiğini göstermiştir. [50].



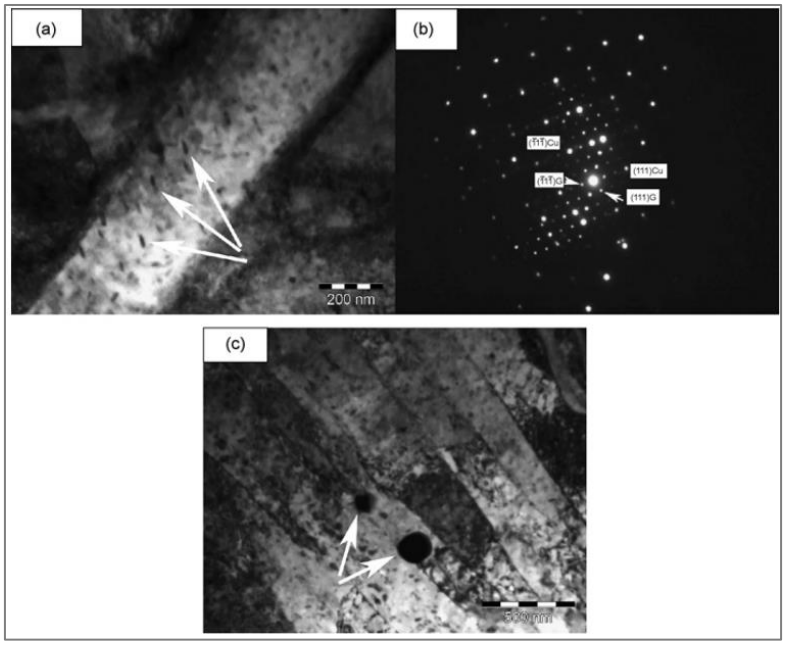
Şekil 2.44. 1100 veya 1200 °C'de östenitlenmiş ve yağda söndürülmüş 17Cr-2Ni çelik numuneler için temperleme sıcaklığının fonksiyonu olarak oda sıcaklığı kırılma tokluğu (kritik çatlak açılma yer değiştirmesi y ekseni ile gösterildiği gibi) [50]

Viswanathan, Banerjee ve Krishnan, 17-4 PH paslanmaz çeliğin farklı sıcaklıklarda yaşlandırılmasının mikroyapı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. 470°C sıcaklıkta yapılan yaşlandırma işlemi sonucunda materyaldeki martensitik yapıların çözündüğü gözlemlenmiştir. Yaşlandırmanın daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilmesinin, daha fazla sayıda çözümlenen yapı sınırlarına sebep olduğu tespit edilmiştir. 6-ferrit fazının morfolojisine gelince, 510°C'de 8 saat süreyle gerçekleştirilen yaşlandırma işleminin esasen bu morfolojide bir değişiklik yaratmadığı, ancak 600°C'de sadece 2 saat sürecek yaşlandırmada 6-ferrit kirişlerinin bölünmesinin meydana geldiği ortaya çıkmıştır. Çözelti işleminden sonra alaşım üzerinde yapılan TEM analizinde, üst üste gelen martensitik ünitelere sahip gecikmiş martensit morfolojisi gözlenmiş, fakat dislokasyonların olmasına rağmen düzenli bir kayma sistemine rastlanmamıştır. 510°C'de 30 dakika süreyle yaşlandırılan malzemedeki yapı, düzenli dislokasyon dizileri ve koherent çökelti oluşumu sayesinde iyileştirilmiş göstermiştir. Uzun süreli yaşlandırmanın sertlik üzerinde ciddi bir değişim yapmadığı ya da çökelti büyümesine neden olmadığı; ancak 600°C'de 1 saat süren yaşlandırma işleminin sertlikte önemli bir düşüşe yol açtığını belirlemişlerdir [51].



Şekil 2.45. (a) 470 °C (b) 510 °C ve (c) 600 °C'de 1 saat yaşlandırılmış alaşımın mikroyapısı [51]

Wang ve arkadaşları, 17-4PH paslanmaz çelik alaşımının 350°C sıcaklıkta 10.000 saatten fazla bir süre boyunca yaşlandırılmasının etkileri üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Araştırma sonuçları, uzun süreli yaşlandırma işlemi sırasında bakır, karbür ve G-fazı gibi çeşitli çökelti türlerinin gelişimini ortaya koymuştur. Ayrıca, yaşlandırma süreci ilerledikçe ters östenit fazının varlığının ve büyüklükleri artan çökelti oluşumlarının gözlemlendiği tespit etmişlerdir [52].



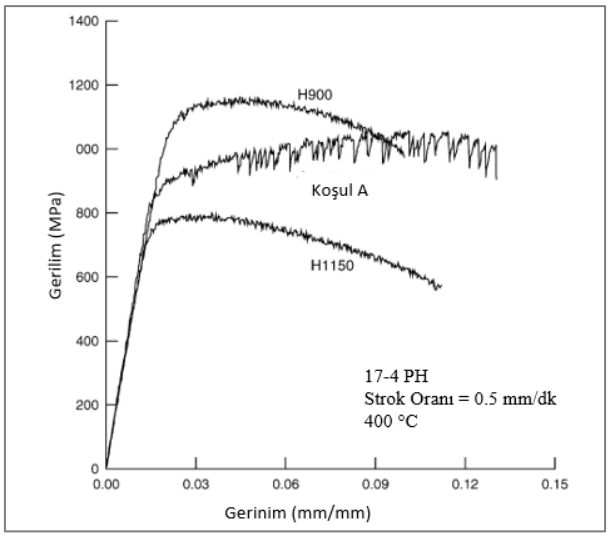
Şekil 2.46. 17-4 PH'ın 350 °C'de 15 ay yaşlandırıldıktan sonraki mikroyapısı (a) G-Fazının çökelmesi (oklu); (b) (a)'nın SADP'si; (c) NbC'nin çökelmesi (oklu) ve lath martensit matrisi [52]

Wu ve Lin'in gerçekleştirdikleri çalışmada, 17-4 PH paslanmaz çeliğin farklı ısıl işlem koşullarının mekanik özelliklerine ve yorgunluk davranışına etkileri araştırılmıştır. Çelik numuneler, farklı sıcaklıklarda çözelti tavlama ve yaşlandırma işlemleri uygulanarak ısıl

işlemlere tabi tutulmuşlar. Çelik numunelerin döngüsel gerilim tepkisi (Cyclic Stress Response - CSR), değişken gerinim hızları ve sıcaklıklar altında incelenmiştir. Elde edilen CSR eğrileri analizi, çeliğin 300°C ve 400°C gibi düşük sıcaklıklarda döngüsel sertleşme davranışı sergilediğini, buna karşılık 500°C gibi daha yüksek sıcaklıklarda ise döngüsel yumuşama davranışı gösterdiğini ortaya koymuştur. Yaşlandırılmamış hali olan koşul A'nın, döngüsel sertleşmeye işaret eden ve negatif gerinim hızı bağımlılığı içeren belirgin bir stres tepkisine sahip olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan, yaşlandırılmış koşullara sahip örneklerin (H900 ve H1150), CSR testleri sırasında gerinim açısından belirgin bir değişiklik göstermediği belirlemişlerdir [53].

Çizelge 2.43. 17-4 PH paslanmaz çeliklerin farklı yaşlandırma koşullarında oda sıcaklığı mekanik özellikleri [53]

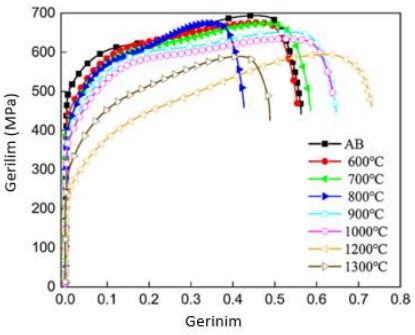
Koşul	MÇD (MPA)	Akma Dayanımı (MPa)	Elastik Modül (GPa)	Uzama (25mm'de) (%)	Sertlik (HRc)	V-notch darbe dayanımı (J)
Koşul A	1018	992	199	13,4	32	67
H900	1414	1387	223	12,5	44,5	21
H1150	966	880	196	18,4	31,5	75



Şekil 2.47. 17-4 PH paslanmaz çeliklerin 400 °C'de test edilen üç koşuldaki monoton gerilme-gerinim eğrileri [53]

Yang vd., Seçici Lazer Ergitme (SLM) ile üretilen 304L paslanmaz çelik örneklerin ısıl işleme tabi tutulduktan sonraki mikroyapısal değişimleri, mekanik özellikleri ve korozyon direnci üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Araştırmanın sonuçları, ısıl işlemin uygulandığı farklı sıcaklıkların mikroyapıdaki yapı boyutu dağılımını ve faz dönüşümünü etkilediğini

göstermiştir. Ayrıca ısıl işlemin özellikle dayanıklılık ve süneklik gibi mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkisi olduğu saptanmıştır. Bu bulgular ısıl işlemenin SLM ile üretilen paslanmaz çeliklerin mikroyapısal özellikleri ve performansı üzerindeki önemli rolünü olduğunu göstermektedir. Şekil 46'da yapılan test sonuçları verilmiştir [54].



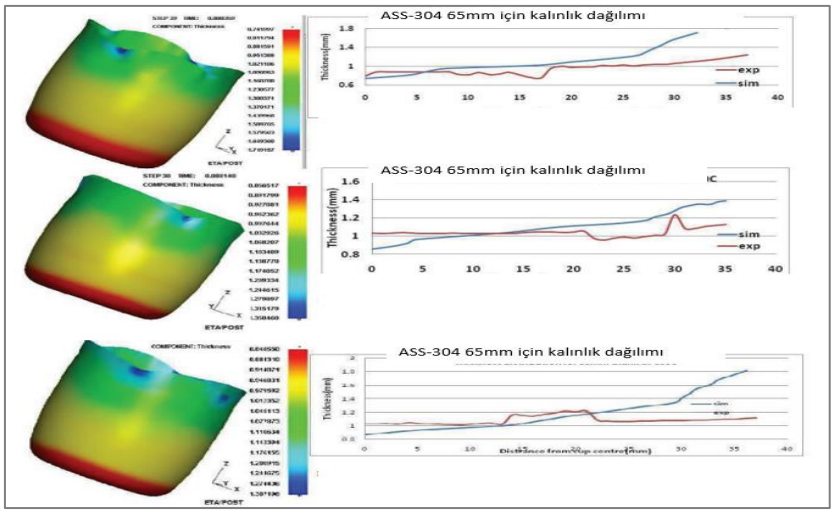
Numune	AD (MPA)	MÇD (MPA)	Uzama %	Akma Oranı (AD/MÇD)
AB	485.2±0.2	693.9±3.9	56.3±0.2	0.70
600 °C, 2 h	427.4±3.3	678.4±3.5	55.3±0.1	0.63
700 °C, 2 h	405.6±5.4	676.7±4.4	58.0±0.5	0.60
800 °C, 2 h	385.7±5.3	674.4±1.2	42.7±1.9	0.57
900 °C, 2 h	367.6±15.0	651.5±8.0	64.8±0.9	0.56
1000 °C, 2 h	353.8±9.8	634.0±0.7	63.6±0.8	0.55
1200 °C, 2 h	218.8±10.0	597.5±1.3	73.4±1.7	0.37
1300 °C, 2 h	276.0±10.1	589.4±9.8	48.8±0.7	0.47

Şekil 2.48. SLM ile üretilmiş 304L'nin AB ve farklı ısıl işlem koşulları altında mühendislik gerilme-gerinim eğrileri [54]

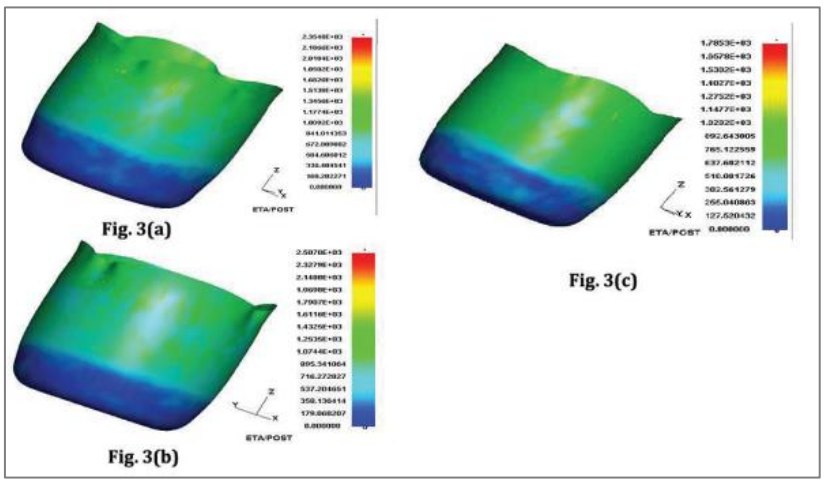
2.3. Paslanmaz Çeliklerin Şekillendirilebilirliği

Paslanmaz çelik malzemelerin şekillendirebilirlik özellikleri, metal işleme endüstrisinde kritik bir öneme sahiptir. Özellikle, şekillendirilebilirliğin alt boyutları olan form verme kapasitesi, kırığı önleme ve yüzey kalitesini iyileştirme, üretim süreçlerinin verimliliğini ve ürün kalitesini doğrudan etkileyen faktörlerdir. Bu bağlamda, paslanmaz çeliklerin mekanik ve termal özellikleri üzerinde yoğun araştırmalar yapılmaktadır.

Lade vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yüksek sıcaklıklarda, özellikle östenitik paslanmaz çelik 304'ün şekillendirilebilirliğini araştırmışlardır. Derin çekme işlemleri için sıcaklığın etkileri üzerinde yapılan çalışmalar, sıcaklık artışının malzemenin şekillendirilebilirlik özelliklerine olumlu etkileri olduğunu göstermiştir. Dynaform simülasyon yazılımı kullanılarak yürütülen analizler, yüksek sıcaklıklarda, malzemenin boyun verme eğiliminin azaldığını ve gerilme dağılımının daha eşit olduğunu ortaya koymuştur ancak daha yüksek sıcaklıkların dinamik gerilme yaşlanmasına ve potansiyel kırılganlığa yol açabileceğine vurgu yapılmıştır [56].



Şekil 2.49. (a) oda sıcaklığında (b) 150°C'de (c) 300°C'de 65mm işlenmemiş parça için teorik ve deneysel kalınlık dağılımı sonuçlarının karşılaştırılması [56]

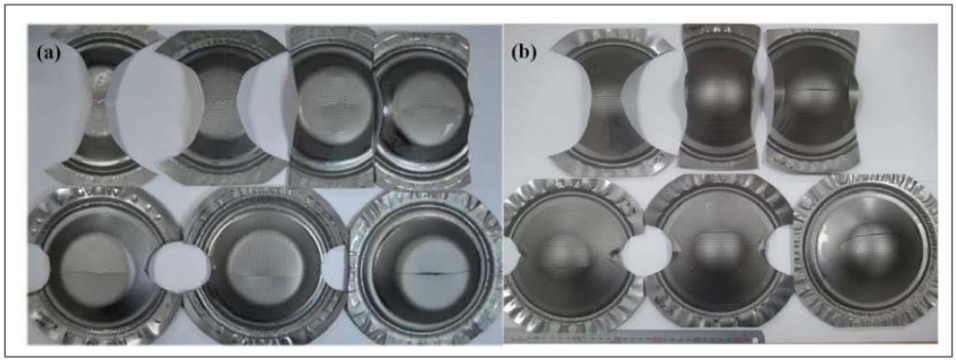


Şekil 2.50. Çekilmiş kapta simüle edilmiş von-mises gerilmeleri (a) oda sıcaklığında (b) 150°C'de (c) 65mm boş için 300°C'de [56]

Bong, H.J., F.d.r. Barlat ve M.-G. Lee çalışmalarında iyileştirilmiş Marciniak ve Nakazima testleri kullanarak 98 μm kalınlığında bir ferritik paslanmaz çelik sacın şekil verme sınırlarını (FLD) incelemişlerdir. Ultra ince sacın üzerinde yapılan Marciniak ve Nakazima yöntemleriyle şekillendirme testleri, bu iki metodun karşılaştırılmasıyla, ultra ince metallerin form verme limitlerinin (FLD) belirlenmesinde Marciniak testinin daha güvenilir olduğunun altını çizmiştir. Bunun sebebi, Marciniak testinin büküme ve sürtünme etkilerinin minimize edilmesindeki etkinliğidir. Şekillendirilebilirlik üzerine yapılan başka bir çalışmada, 304 paslanmaz çelik ile bakır katkısının kombinasyonu, malzemenin şekillendirme performansında düşüşe ve çatlama eğilimine yol açtığını belirlemişlerdir [57].

Çizelge 2.44. Ultra ince ferritik paslanmaz çeliğin çekme özellikleri [57]

RD'ye göre oryantasyon	AD (MPa)	MÇD (MPa)	Uzama %	Toplam Uzama %	İş sertleşmesi üssü	R Değeri
0°	455	577	19.4	26.3	0.213	1.79
45°	464	580	19.7	28.2	0.223	1.82
90°	465	572	19.8	32.2	0.226	2.51



Şekil 2.51. (a) Marciniak testi ve (b) Nakazima testinden elde edilen kırılmış numuneler [57]



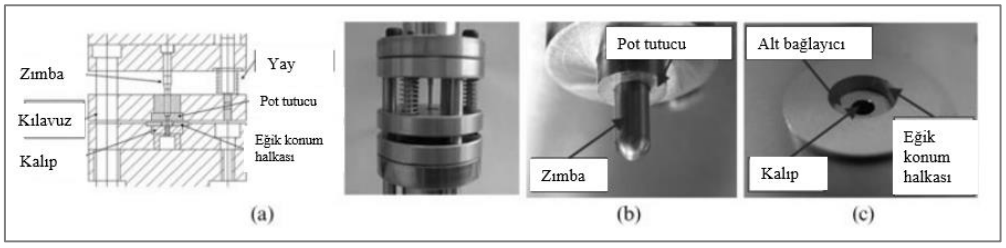
Şekil 2.52. Nakazima testinde istenmeyen kırıklar [57]

Chen, C.-H., Lee, R.-S. ve Gau, J.-T.'nin çalışmaları, mikro ölçekli sac metal şekillendirme süreçlerinde, 304 paslanmaz çelik sac metalin şekillendirilebilirliğini etkileyen parametreleri analiz etmişlerdir. Bu kapsamda, sac metal kalınlığı, tane boyutu ve T/D oranı gibi faktörlerin şekil verme kabiliyeti üzerindeki etkisine odaklanılmıştır. Malzemenin farklı deformasyon şartlarında şekillendirilebilirliğini değerlendirmek için Keeler-Goodwin Şekil Verme Sınırlama Diyagramı (FLD) kullanılmış, sac metalin yarı küresel bir zımba ile çekme esnasında yuvarlak yüzey ızgaralarıyla FLD oluşturmuşlardır. Paslanmaz çelik 304 sacının mikro ölçekli şekillendirilmesi bağlamında, şekil verme limitlerini tahmin etmek için iki ayrı

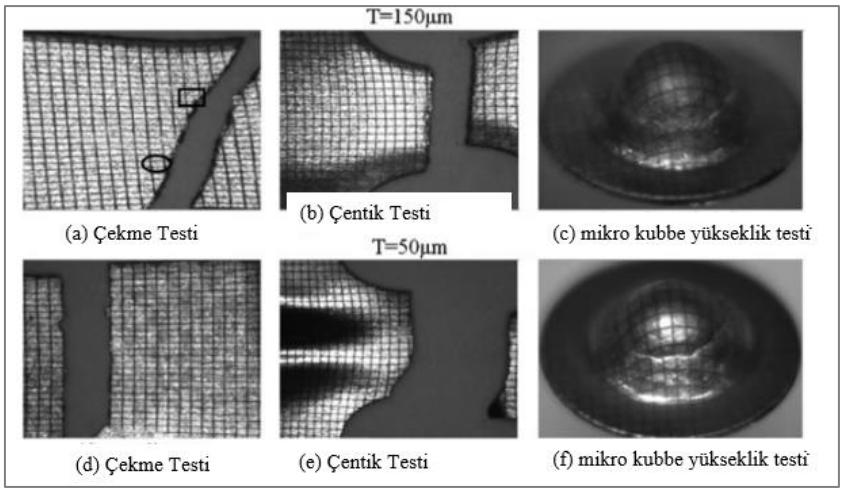
model geliştirmişlerdir; ilk model, 100 µm ve üzeri kalınlıklar için uygunken, ikinci model herhangi bir kalınlık ve T/D oranı için geçerli sonuçlar ortaya çıkarmışlardır [58].

Çizelge 2.45. Folyolar için ortalama tane boyutları ve T/D oranları [58]

	150 µm		100 µm		50 µm		20 µm	
Isıl İşlem Derecesi (°C)	Tane Büyüklüğü (µm)	T/D Oranı	Tane Büyüklüğü (µm)	T/D Oranı	Tane Büyüklüğü (µm)	T/D Oranı	Tane Büyüklüğü (µm)	T/D Oranı
1050	31.36 (+5.11, −6.77)	4.78	29.54 (+4.27, −4.18)	3.39	22.45 (+4.60, −2.16)	2.23	21.18 (+1.60, −1.42)	(1.94)
1000	22.37 (+3.37, −3.97)	6.70	21.40 (+3.96, −3.50)	4.67	16.19 (+3.73, −3.30)	3.09	12.01 (+0.48, −0.62)	1.67
950	12.84 (+4.08, −3.53)	11.68	12.57 (+1.75, −1.98)	7.96	9.13 (+1.61, −0.83)	5.48	8.04 (+0.31, −0.32)	2.49
900	7.69 (+1.44, −0.93)	19.50	5.65 (+2.47, −1.30)	17.71	4.75 (+1.34, −1.27)	10.54	4.52 (+0.55, -0.71)	4.43



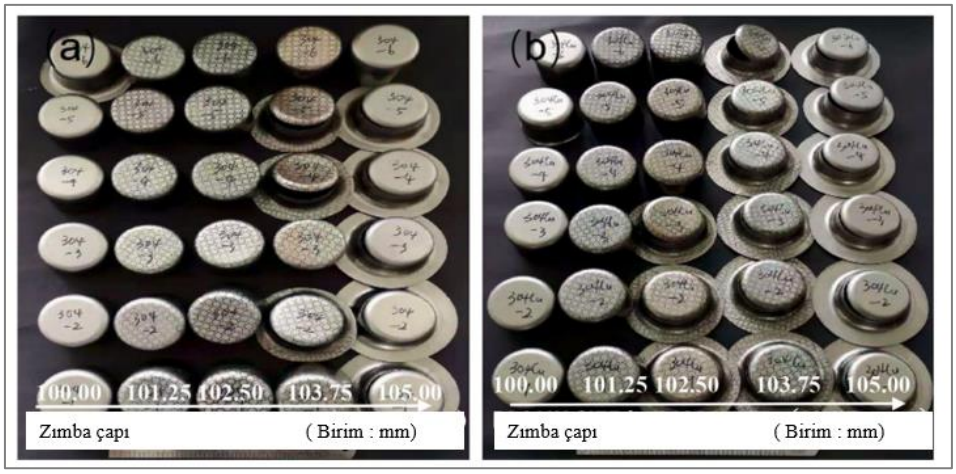
Şekil 2.53. (a) kubbe yüksekliği test düzeneği; (b) zımba ve pot tutucu; (c) bağlayıcı ve kalıp [58]



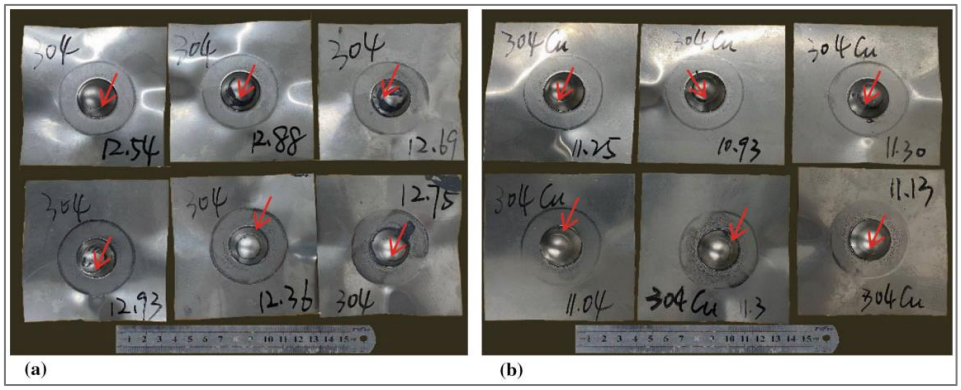
Şekil 2.54. 950°C'de ısıl işlem altında (a)-(c) 150 µm (d)-(f) 50 µm kalınlıktaki kırılma görüntüleri [58]

Huang vd., 304L östenit paslanmaz çeliğin şekillendirilebilirlik özelliklerini geliştirmeyi hedefleyerek bakırın eklenmesinin etkilerine odaklanmışlardır. Araştırma, bakır ilavesinin

östenit hacmini koruduğunu ve böylece malzemenin dayanıklılığını ve çekme kapasitesini iyileştirdiğini ortaya çıkarmıştır; bakır zengini çökelti, etkili bir şekilde arametalik güçlendirme sağlamıştır. Bununla birlikte, bakır katkılı malzemenin şekil verme sürecinde kırılma eğilimi gösterdiği ve bu durumun şekillendirme performansını olumsuz etkilediği tespit etmişlerdir. Derin çekme, kupalama ve konik kupa testleri gibi değişik şekillendirme deneyleri uygulayarak, eklenen bakırın çeliğin şekil verilebilirliğine etkileri değerlendirmişlerdir. Çalışma genel olarak, bakırın ilave edilmesinin 304L östenit paslanmaz çeliğin şekillendirilebilirliğini olumsuz yönde etkilediği sonucuna ulaşmışlardır [59].



Şekil 2.55. Çekme testlerinden sonra numuneler: (a) 304 L ve (b) 304L-Cu [59]

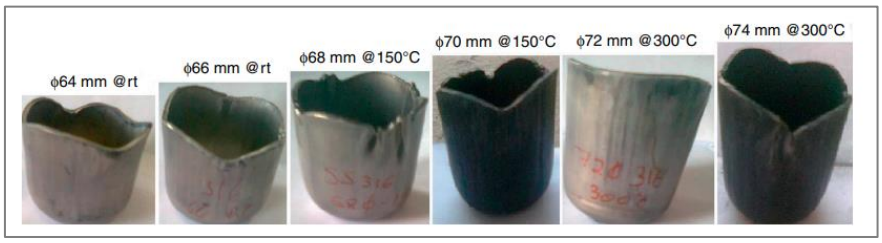


Şekil 2.56. Çekme testlerinden sonra numuneler: (a) 304 L ve (b) 304L-Cu (kırmızı okla gösterilen konum bir çatlağın bulunduğu yerdir) [59]

Çizelge 2.46. 304L ve 304L-Cu'ya ait mekanik özellikler [59]

Malzeme	Yön (°)	AD (MPa)	MÇD (MPa)	AD/MÇD	Uzama (%)	n	r
304L	0	322	889	0.36	51	0.304	0.855
	45	301	835	0.36	53	0.279	0.782
	90	318	849	0.37	53	0.274	0.701
304L-Cu	0	329	696	0.47	42	0.270	0.760
	45	340	680	0.50	49	0.260	0.824
	90	322	649	0.50	53	0.249	0.611

Hussaini, S.M., S.K. Singh ve A.K. Gupta çalışmalarında, yüksek mukavemetli metallerin derin çekme işlemi üzerine odaklanarak özellikle paslanmaz çelik 316'yı incelemişlerdir. 1.0 mm kalınlığındaki 316 paslanmaz çelik saclar üzerinde özel olarak hazırlanmış deney düzeneği sayesinde farklı sıcaklıklarda derin çekme testleri gerçekleştirmişlerdir. Levhaların LDR ve kalınlık değerleri, LS-Dyna yazılımı kullanılarak yapılan sonlu eleman simülasyonları ile belirlenmiştir. LS-Dyna yazılımını kullanarak yapılan sonlu eleman simülasyonları, deneysel verilerle doğrulanan yüksek doğrulukta sonuçlar üretmiştir. Ayrıca yapay sinir ağı (ANN) modeli kullanılarak, bilinmeyen sıcaklıklardaki sac kalınlığı tahminleri yapan çalışmalar da yapmışlardır [60].



Şekil 2.57. Farklı çap ve sıcaklıklarda çekme numuneleri [60]

Talyan, V., R.H. Wagoner, ve J.K. Lee; CNC freze tezgahı kullanılarak sac metal şekillendirme üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışma, işlem parametrelerinin, örneğin takım dönme hızı, kademeli derinlik ve ilerleme hızı gibi şekillendirilmiş bir titanyum sacın duvar açısı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerine odaklanmışlardır. Farklı işlem parametre kombinasyonları için deneysel tasarım ve sonuçları elde etmişlerdir. Duvar açısının kademeli derinlik arttıkça azaldığını mil hızının duvar açısı üzerinde minimal bir etkisi olduğunu yüzey pürüzlülüğü de kademeli derinlik arttıkça artmakta olduğunu gözlemlemişlerdir. Optimizasyon analizine dayanarak, 200 dev/dak mili dönme hızı, 1000 mm/dak ilerleme hızı ve 0.1 mm artımsal derinlikle elde edilen maksimum duvar açısı 29,74°

olarak bulmuşlardır. 30°'lik istenilen duvar açısından sapma yaklaşık 0.26°'dir. Sac metal şekillendirme uygulamalarında istenen şekillendirme karakteristiklerini elde etmek için işlem parametrelerini optimize etmenin önemini vurgulamışlardır [61].



Şekil 2.58. ISMF'e ait deneysel numune [61]

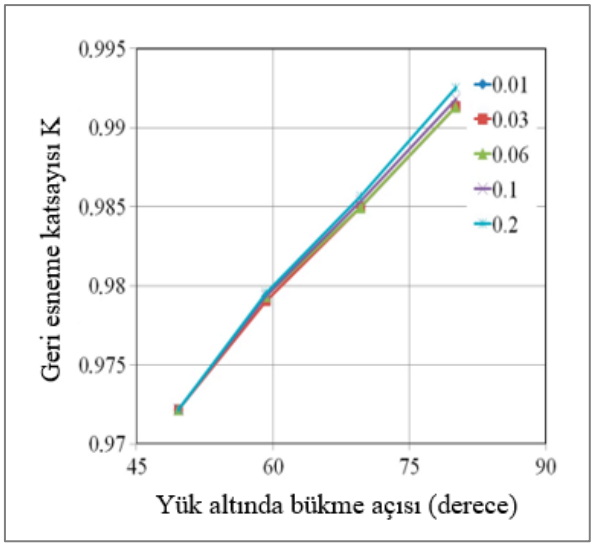
Çizelge 2.47. Deneysel tasarım ve tepki değerleri [61]

No	Sıcaklık	LDR	Mesafe	Deney	Tahmin	Hata	Hata %
1	50	66	7	0.902	0.913	0.011	1.1
2	50	66	20	0.997	1.002	0.005	0.5
3	50	66	23	1.019	1.017	0.002	0.2
4	50	66	24	1.019	1.019	0.000	0.0
5	50	66	30	1.056	1.054	0.002	0.2
6	150	70	6	0.915	0.915	0.000	0.0
7	150	70	19	0.925	0.926	0.001	0.1
8	300	74	11	0.859	0.856	0.003	0.3
9	300	74	17	0.856	0.865	0.009	0.9
10	300	74	18	0.866	0.878	0.012	1.2
11	300	74	25	0.949	0.951	0.002	0.2

2.4. Sac Malzemelere Uygulanan V-Bükme İşlemi

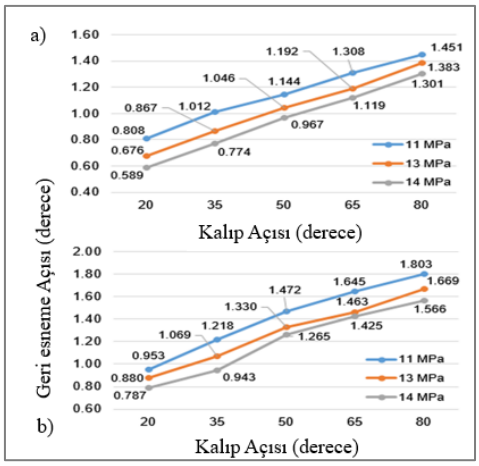
Bükme işleminde, malzeme ve işlem parametrelerinin geri esneme davranışı üzerindeki etkisi, üretim mühendisliği ve malzeme bilimi alanlarında kapsamlı bir araştırma konusudur. Geri esneme, işlenmiş parçanın istenen son şeklini koruyamayarak, elastik deformasyon nedeniyle orijinal haline kısmen dönmesi olayıdır ve bu, bükme işleminin hassasiyetini doğrudan etkiler.

Trzepiecinski ve Lemu'nun yaptıkları çalışmada, sayısal simülasyonlar yoluyla çeşitli hesaplama parametrelerinin, geri esnemenin tahmin edilmesi üzerindeki etkileri antagonistik şekilde incelemişlerdir. Haddeleme yönüne dik olarak kesilen numunelerin, haddeleme yönünde kesilmiş olanlara kıyasla daha yüksek geri esneme sergilediği gözlenmiştir; bu durum, yük altındaki büküm açısı ile geri esneme katsayısı arasındaki lineer ilişkiyle desteklenmektedir. Sayısal modelleme çalışmaları, beş entegrasyon noktasının hem hesaplama verimliliği hem de tahmin doğruluğu açısından yeterli olduğunu ortaya koyarken, sürtünme katsayısının da geri esneme miktarları üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir. Bu bağlamda, Gauss kuralı kullanılarak yapılan beş noktalı iterasyon, geri esneme oranı tahminlerinde etkin ve doğru bir yöntem olarak belirlemişlerdir [62].



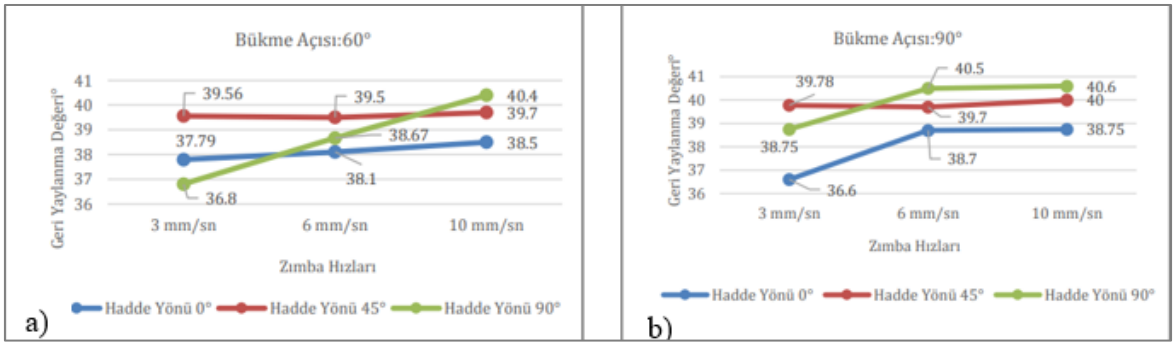
Şekil 2.59. Yük altında bükme açısına göre geri esneme katsayısı [62]

Karağaç İ. çalışmasında V-bükme kalıpları kullanarak bakır ve pirinç sac metal malzemelerin bükülmesinden kaynaklanan geri esnemeyi etkileyen faktörleri deneysel olarak incelemektedir. Deneysel çalışmalarda işlem parametreleri olarak; 0, 5 ve 10 saniyelik tutma süresi, bükme açıları ve 10, 12 ve 14.4 MPa sıvı basınçları belirlenmiştir. Sac metaller, flexforming ve geleneksel bükme işlemleriyle V-bükme kalıplarında şekillendirilerek, flexforming işleminin performansı geleneksel bükme işlemiyle karşılaştırılmıştır. Flexforming işlemi kullanılarak şekillendirilen bakır ve pirinç sac metaller için belirlenen geri esneme değerleri, sırasıyla geleneksel bükme metoduna göre %39.06 ve %41.42 daha azdır. Geleneksel bükme metodunda oluşan yüzey kusurları, flexforming işlemi kullanılarak şekillendirilen parçalarda gözlemlenmemiştir [63].



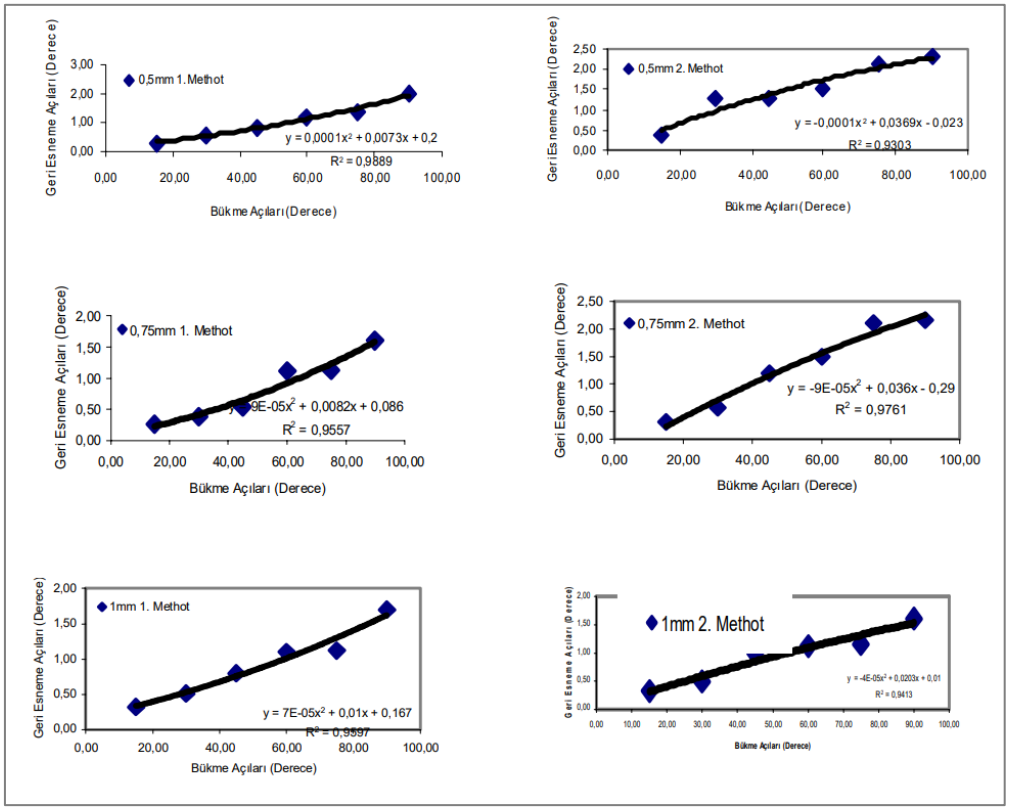
Şekil 2.60. Geri esneme tahmini a) bakır b) pirinç [63]

Karabulut S. ve Esen İ. yaptıkları çalışmada, SCGADUB1180 isimli yüksek mukavemetli çelik sacın çekme testleri ve V şeklinde bükme işlemine tabi tutulduğunda zımba hızı, kalıp açısı, ütüleme zamanı ve haddeleme yönü gibi faktörlerin geri esneme ölçüsüne olan tesiri deneysel metodlarla incelemişlerdir. Gerçekleştirilen deneylerde, zımba hızının artmasıyla birlikte 60°, 90° ve 120° bükme açılarındaki geri yaylanma değerlerinin yükseldiği gözlemlemişlerdir. 60°'lik bükme açısı için zımba hızı 3 mm/s'den 10 mm/s'ye çıkarıldığında geri esneme; 0° haddeleme yönünde %1.87, 45° haddeleme yönünde %0.35 ve 90° haddeleme yönünde %9.78 oranında artış göstermiştir. Benzer şekilde, 90° bükme açısında bu hız artışıyla geri esneme; 0° haddeleme yönünde %5.87, 45° haddeleme yönünde %0.55 ve 90° haddeleme yönünde %4.77 oranında artmıştır. 120° bükme açısında aynı hız artışı geri esneme; 0° haddeleme yönünde %27, 45° haddeleme yönünde %0.49 ve 90° haddeleme yönünde %3.5 yükseltmiştir. En düşük geri yaylanma değerleri, 3 mm/s zımba hızında kaydedilmiştir. Ütüleme süresinin 0.2 saniyeden 1 saniyeye çıkartılmasıyla geri esneme % 5.56 oranında azalmıştır ve 0° haddeleme yönünde en az geri esneme tespit etmişlerdir [64].



Şekil 2.61. Farklı hızlardaki geri yaylanma değerleri a) 60°, b) 90°

Tekaslan, Ö., Gerger, N., ve Şeker, U. yaptıkları çalışmada, büküm kalıpları kullanılarak geri esneme miktarının deneysel olarak ölçülmesine dair bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Onsekiz farklı modüler kalıpta, dört ayrı bükme tekniği ile üç farklı kalınlıktaki bakır malzeme üzerinde, her biri için en az on örnekten oluşan 720'den fazla deney numunesi, bükülüp bilgisayar destekli analizler sonucunda değerlendirilmiş ve elde edilen geri esneme grafikleri çizilmiştir. Geri esneme değerlerinin 0.50 ile 50 arasında değiştiği gözlemlemişlerdir. Ayrıca, üzerine basınç uygulanan büküm malzemesinin bekletilmesi süresinin geri dönüşü azalttığı, malzeme kalınlığı ve büküm açısının artmasıyla geri esneme değerlerinin arttığı saptanmışlardır [65].

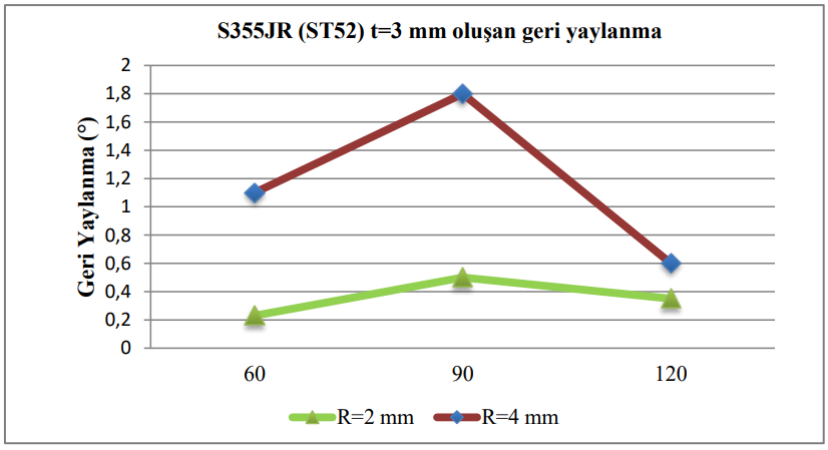


Şekil 2.62. Geri esneme grafikleri ve elde edilen polinom eğri denklemleri

Gürün, H., Çavuşoğlu, vd., AA2024 alaşımının v-bükme işlemi sonrasında geri esneme davranışını incelemişlerdir. Araştırma kapsamında, 60°, 90° ve 120° büküm açılarına özgü ve her bir açı için üç farklı büküm yarıçapı kullanılarak deneyler yapmışlardır. Deney sonuçları, kullanılan bükme açılarının geri esnemeyi direkt olarak etkilediğini göstermiş, 60° ve 90°'lik zımbalar kullanılarak yapılan deneylerde büküm süreçlerinde kırılmalar oluşurken, 120°'lik zımba ile istenilen büküm işlemini gerçekleştirebilmişlerdir. Zımba uç

yarıçapının da geri esneme değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve yarıçapın büyüklüğü arttıkça geri esnemenin arttığını gözlemlemişlerdir [66].

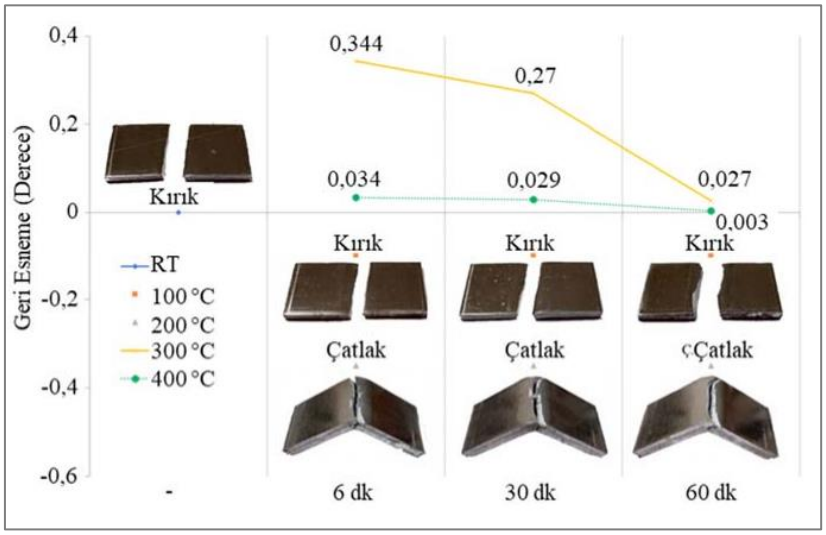
Butgül, İ., Basmacı, G., ve Sayın, L. çalışmalarında, S355JR sac malzemesinin V-bükme işleminde geri esneme davranışını incelemişlerdir. 355JR (ST52) standardına uygun sac metal levhalar kullanılarak 2 mm ve 3 mm kalınlıklarında, 60°, 90° ve 120° bükme kalıp açıları dahilinde ve ayrıca 2 mm ve 4 mm büküm radyüsleri uygulanarak deney yapmışlardır. Deney sonuçları, S355JR (ST52) sac levha malzemesinin büküm işlemi sonrasında belirgin bir geri esneme gösterdiğini, kalıp açısının artışı ile geri esneme miktarının düştüğünü, levha kalınlığındaki artışın geri esnemeyi azalttığını ve büküm radyüsünün yükseltilmesi durumunda geri esnemeyi arttığını göstermiştir [67].



Şekil 2.63. 3mm kalınlığın S355JR sac levhanın kalıp açısına göre geri yaylanma grafiği [67]

Karaağaç, İ., Kabakçı, M. O., ve Demirel, M. Y. Yaptıkları çalışmada, Al7075-T6 sac malzemede tavlamanın şekillendirilebilirlik ve geri esnemeye etkilerinin deneysel olarak incelemişlerdir. Tavlama süreci, 100°C, 200°C, 300°C ve 400°C gibi farklı sıcaklıklarda ve 6, 30, 60 dakika gibi çeşitli tutma sürelerinde uygulanmıştır. Tavlama işlemi sonrasında, Al7075–T6 numunelerin şekillendirilebilirlikleri 15°, 30°, 45°, 60° ve 75°'lik V bükme kalıpları kullanılarak sabit bir deformasyon hızında değerlendirilmiştir. Tavlanmamış numuneler en fazla 15°'ye kadar büküm açıları ile şekillendirilirken, tavlama işlemi 300°C ve üzeri sıcaklıklarda yapılan numuneler 75° büküm açısında bile çatlama ya da kırılma olmaksızın sorunsuz bir şekilde şekillendirilebilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda tavlama uygulanmış numunelerin, düşük sıcaklıklarda tavlama görmüş numunelere oranla geri

esneme davranışlarının önemli ölçüde, yaklaşık %80-90 oranında, daha az olduğu ortaya çıkarmışlardır [68].



Şekil 2.64. 75° büküm açısında şekillendirilebilirlik-geri esneme ilişkisi [68]

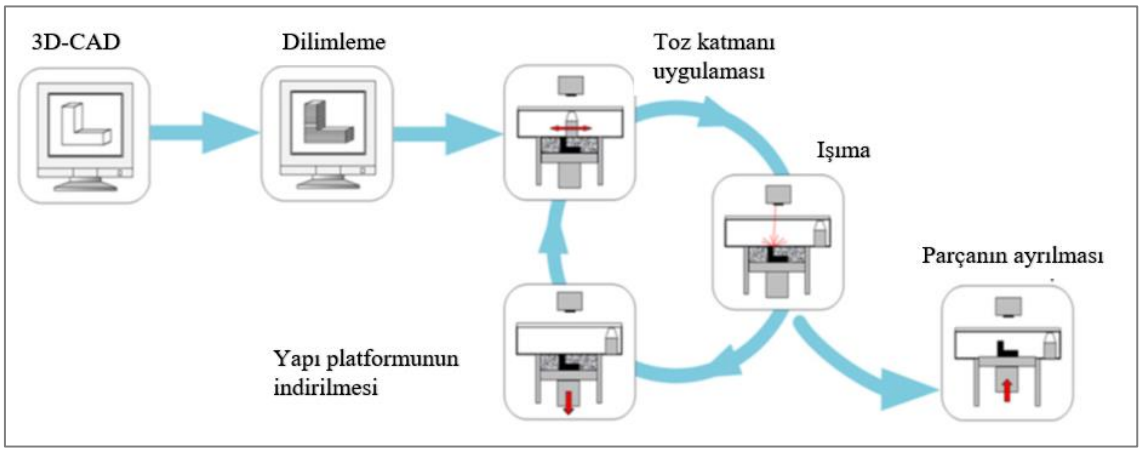
17-4 PH malzemeler için yapılan kapsamlı literatür araştırması sonucunda, eklemeli imalat ile üretilen 17-4 PH malzemelerin daha çok mikroyapı ve ısıl işlem parametreleri üzerine yoğunlaşıldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca 17-4 PH için eklemeli imalat ile üretim prosesleri üzerine de çok sayıda çalışma yapıldığı belirlenmiştir. Gerek 17-4 PH malzemelerin farklı kondisyonları için gerekse eklemeli imalat üretim parçaları için farklı ısıl işlem şartlarında malzeme mekanik özellikleri ve mikroyapı değişimleri de literatürde kapsamlı olarak incelenmiştir. Ancak eklemeli imalat parçaları üretim sonrası kullanım yerlerinde çok sayıda farklı yüklemelere maruz kalmaktadır. Bu durumda malzemenin performansı önemli ölçüde etkilenmektedir. Ayrıca eklemeli imalat ile üretilen parçalar yüksek mekanik özellikler göstermekte ancak çok düşük uzama davranışlarından dolayı ve esneme kabiliyetinin az olmasından dolayı kullanım yerlerinde daha performanslı kullanmak için üretim sonrasında ısıl işleme ihtiyaç duymaktadırlar. Bu çalışmada farklı üretim proses parametrelerinin ve ısıl işlem şartlarının malzemenin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin yanı sıra malzemenin mekanik yüklemelere karşı dayanımları da incelenmiştir. Çalışmanın literatürde diğer çalışmalardan farklı olarak bu boşluğu doldurması amaçlanmıştır.

3. MATERYAL VE METOT

Tez çalışması kapsamında öncelikli olarak deney numunelerinin SLM yöntemiyle üretimi gerçekleştirilmiştir. İlk aşamasında üretilen numunelerin karekterizasyonu için mekanik testler uygulanmıştır. Sonraki aşamada da ısıl işlem uygulanarak bazı numuneler kondisyon A'ya (17-4 PH paslanmaz çelik için, çeliğin 1038°C'de ısıtıldıktan sonra hızlı bir şekilde hava ile soğutulduğu çözündürme tavlaması durumu) dönüştürülmüş ve son aşamada da deney numunelerinin deformasyon dayanımları belirlenmesi amacıyla V bükme testlerine tabi tutulmuştur. Yapılan çalışmalar bu bölümde açıklanmıştır.

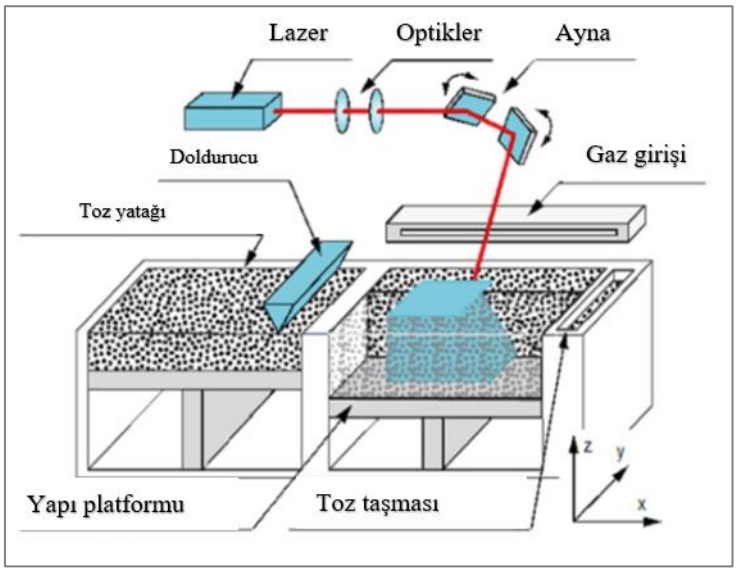
3.1. Deney Malzemelerinin SLM Yöntemi ile Üretimi

Eklemeli imalat yöntemi, geleneksel talaşlı imalat metotlarının aksine, talaş kaldırma işlemine ihtiyaç duymadan istenen ürünü üst üste katmanlar halinde malzeme ekleyerek oluşturma yöntemidir. Eklemli imalat üretim süreci, ince malzeme katmanlarının serilmesi ve toz halindeki malzemelerin talaş kaldırmaya başvurmadan birleştirilmesi aşamalarını içermektedir. Eklemeli imalat yönteminin karmaşık geometrileri, üretilecek parçanın detaylı iç kısımlarını da kapsayacak şekilde oluşturabilme potansiyeli, konvansiyonel metotlara kıyasla kayda değer bir gelişme olarak öne çıkarmaktadır. Eklemeli imalat modelleri, bilgisayar destekli tasarım (CAD) verilerinin profesyonel yazılımlarla ayrıntılı bir şekilde dilimlenmesiyle üretilmektedir [69,70]. Eklemeli imalat yönteminin aşamaları Şekil 3.1'de verilmiştir.



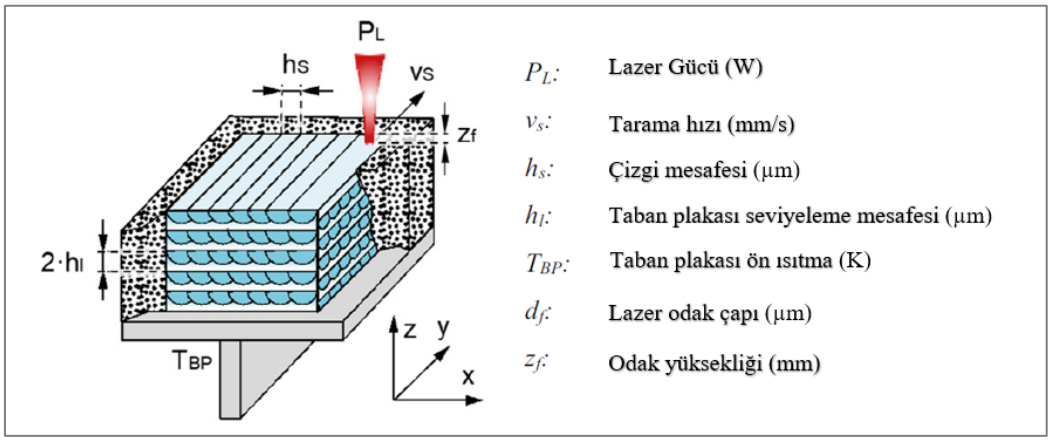
Şekil 3.1. Eklemeli imalat yönteminin aşamaları [71]

Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemi, aynı zamanda lazer tabanlı toz yatak eritme işlemi (LPBF) olarak da bilinen, Al tabanlı, Fe tabanlı, Ti tabanlı, Co tabanlı, Cu tabanlı ve Ni tabanlı alaşımlar dahil olmak üzere çeşitli malzemeleri imal edebilen ve en yaygın kullanılan eklemeli imalat tekniklerinden birisidir. SLM işlemi, havacılık, otomotiv, petrol rafinerisi, denizcilik, inşaat, gıda ve mücevher endüstrileri dahil olmak üzere çok sayıda sektörde tercih edilmektedir [71]. SLM işleminin şematik gösterimi Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. SLM işleme odasının ana bileşenlerle birlikte gösterimi [71]

İşlem parametrelerinin optimizasyonu genellikle deneysel olarak yapılmaktadır. Şekil 3.3'de temel SLM proses parametreleri verilmiştir.



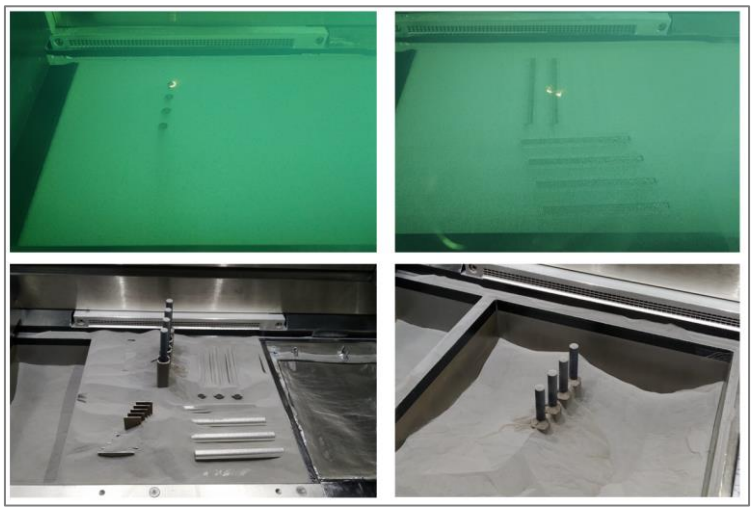
Şekil 3.3. SLM'nin temel proses parametreleri [71]

Deneysel çalışma çerçevesinde, üç farklı yapı oryantasyonunda çekme çubukları ve 40x20x1 mm ölçülerinde dikdörtgen prizma numuneler, EOS M290 [72] marka makine kullanılarak SLM yöntemiyle imal edilmiştir. Üretimde kullanılan toz malzemenin kimyasal kompozisyonu, F899 – 12B (Cerrahi Aletler için İşlenmiş Çelikler) ve A564M – 13 (Sıcak Haddelenmiş ve Soğuk Bitirilmiş Yaşlandırma İle Sertleşen Çelik Çubuklar ve Şekiller) standartlarına uygun olarak belirlenmiş ve 36-44 µm değişen boyutlarda kullanılan toz malzemenin kimyasal kompozisyon Çizelge 3.1'de verilmiştir.

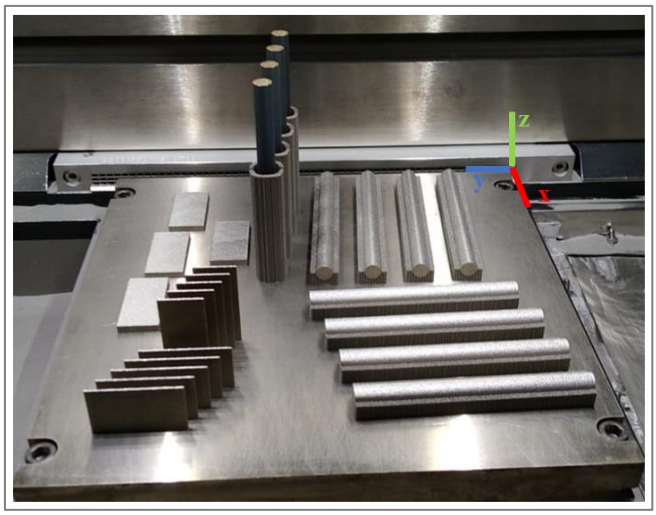
Çizelge 3.1. 17-4 PH malzemesine ait tozun kimyasal bileşimi

Kimyasal Bileşim	Cr	Ni	Cu	Si	Mn	C	P	S	Nb+Ta
17-4 PH	15 – 17.5	3- 5	3- 5	<1	<1	<0.07	<0.40	<0.30	<0.45

Çalışma kapsamında yapı yönlendirmesinin etkisini değerlendirmek amacıyla üç örnek grupta deney malzemeleri üretilmiştir. (i) dikey olarak yapılmış 4 adet silindirik çubuk ve 5 adet dikdörtgen içeren XY düzleminde birinci grup ve (ii) yatay olarak yapılmış 4 adet silindirik çubuk ve 5 adet dikdörtgen içeren YZ düzleminde ikinci grup ve (iii) ikincil yatay ve çizgi mesafesinin y yönünde tanımlanarak yapılmış 4 adet silindirik çubuk ve 5 adet dikdörtgen içeren XZ düzleminde üçüncü grup deney malzemeleri üretilmiş ve üretim ortamının görüntüleri Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'de verilmiştir. Tez çalışmasında kullanılan deney numunelerinin üretim parametreleri olan lazer gücü, tarama hızı, katman kalınlığı ve çizgi aralığı verileri de Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.4. Eklemeli imalat deney numunelerinin üretimi

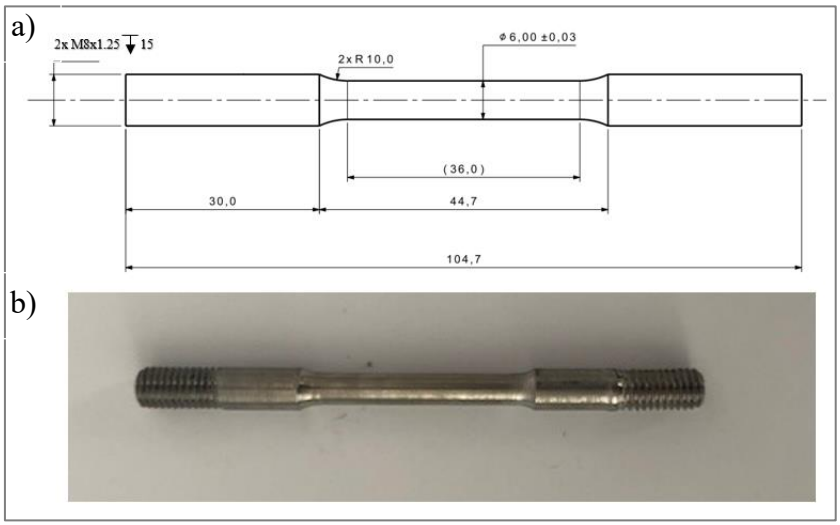


Şekil 3.5. Üretimi tamamlanmış deney numuneleri

Çizelge 3.2. Deney numuneleri üretim parametreleri

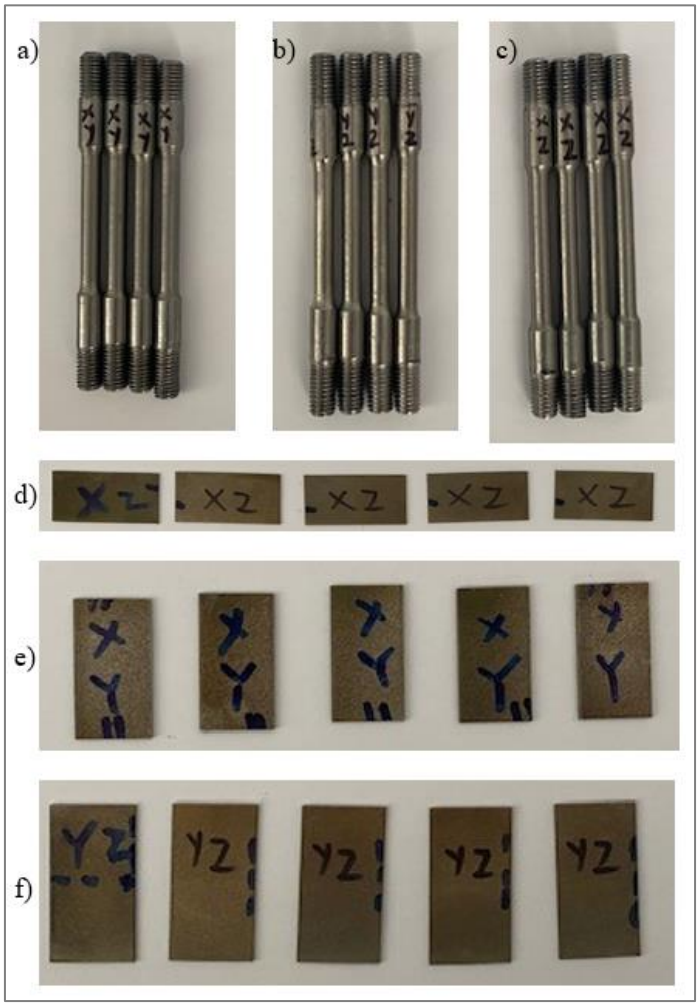
Katman Kalınlığı (mikron)	Lazer Tarama Gücü (W)	Lazer Tarama Hızı (mm/s)	Çizgi Aralığı (mm)
40	180	654	0.11

Üretimi tamamlanan deney numuneleri, Seçici Lazer Ergitme (SLM) alt plakasından tel erozyon tezgahı(WEDM) ile kesilerek ayrılmıştır. Çekme test numuneleri, ASTM E-8 standardına uygun olarak tornalanarak test için hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan çekme testi numunelerinin teknik resmi ve hazırlanan deney numune görüntüsü Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Çekme test numunesi a) Teknik resmi b) Üretimi tamamlanmış numune

Farklı yapı oryantasyonlarında deneysel çalışmalar için hazırlanan numunelerin görüntüsü Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Deney numuneleri a) XY çekme çubuğu, b) YZ çekme çubuğu, c) XZ çekme çubuğu, d) XZ dikdörtgen prizmatik, e) XY dikdörtgen prizmatik, f) YZ dikdörtgen prizmatik

3.2. Deney Numunelerinin Karakterizayonu

Üretilen deney numunelerin karaterizasyonu için çekme testi ve sertlik ölçme testleri yapılmıştır.

3.2.1. Çekme testi

Çekme testi, mühendislikte yaygın olarak kullanılan ve malzemenin mekanik özelliklerini karakterize etmek için yapılmaktadır. Çekme test ile malzemenin akma mukavemeti, çekme

mukavemeti, maksimum çekme dayanımı ve ortalama yüzde uzama gibi temel mekanik özelliklerini belirlenmiştir [74,75]. Bu tez çalışması kapsamında deney hızı ISO 6892-1 metod A'ya gerilme oranı (strain rate) ve normal oda koşullarında, Zwick marka çekme test cihazı kullanılarak deney numunelerinin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Kullanılan çekme test cihazı görüntüsü ve çekme testi görüntüsü Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8. a) Çekme testi cihazı b) Deney numunesinin çekme testi

3.2.2. Sertlik ölçüm testi

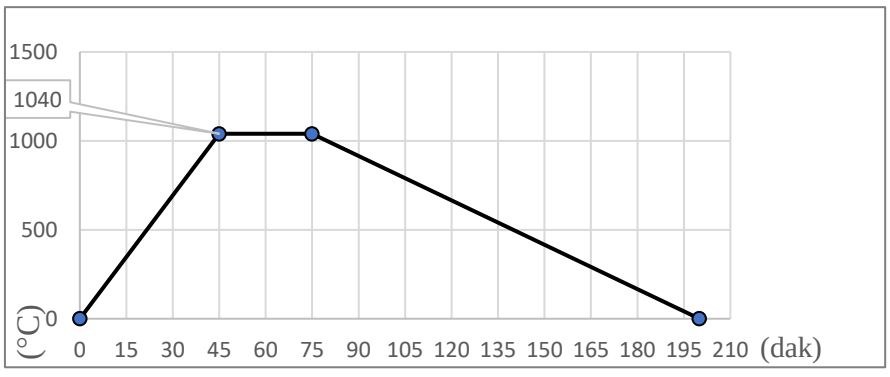
Çalışma kapsamında yapı oryantasyonunun ve ısıl işlemin malzemenin mekanik özelliklerine etkileri tek eksenli çekme testlerinin yanı sıra Rockwell sertlik ölçümleri ile de incelenmiştir. Sertlik ölçümleri ise 150 kg yük ile emco-TEST cihazında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.9'da sertlik ölçme cihazı e sertlik ölçme işleminin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.9. Çekme test numunesinin sertlik ölçümü

3.3. Deney Malzemesinin Isıl İşlemi

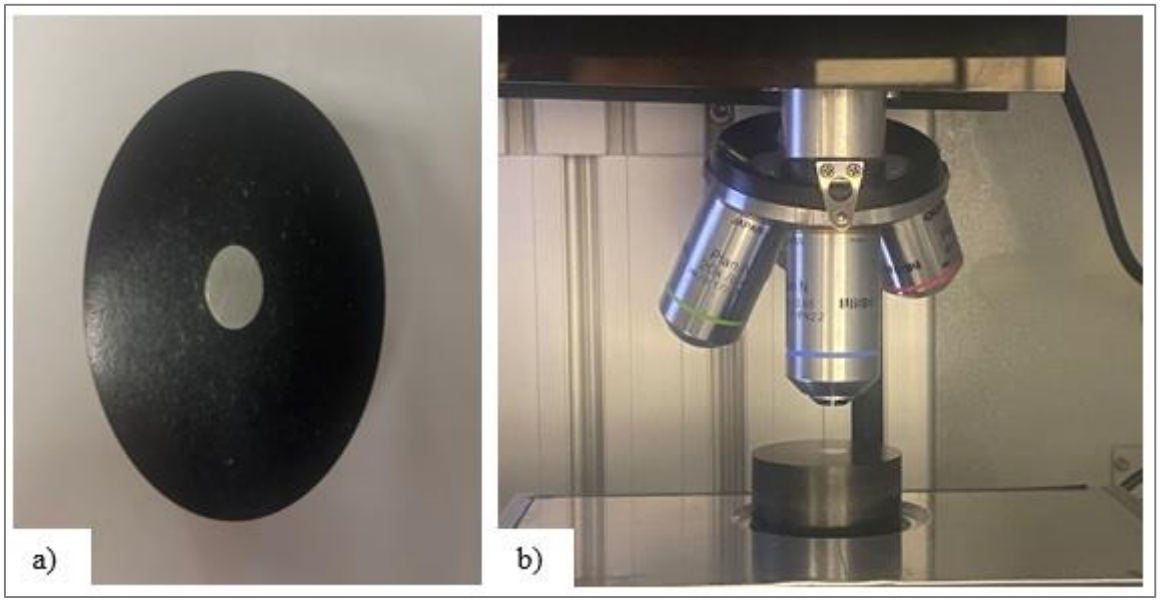
Tez çalışması kapsamında eklemeli imalat yöntemiyle ile 17-4 PH paslanmaz malzemeden üretilen deney numunelerinin yarısı kondisyon A'ya dönüştürmek için ısıl işleme tabi tutulmuştur. 17-4 PH malzemeler Kondisyon A için, çözelti ısıl işlemi, yaklaşık 1040 °C'de 30 dakika süreyle gerçekleştirilmekte ve ardından oda sıcaklığına hava soğutma uygulanmaktadır [73]. Isıl işlem sürecinin grafiksel olarak gösterimi Şekil 3.10'da verilmiştir.



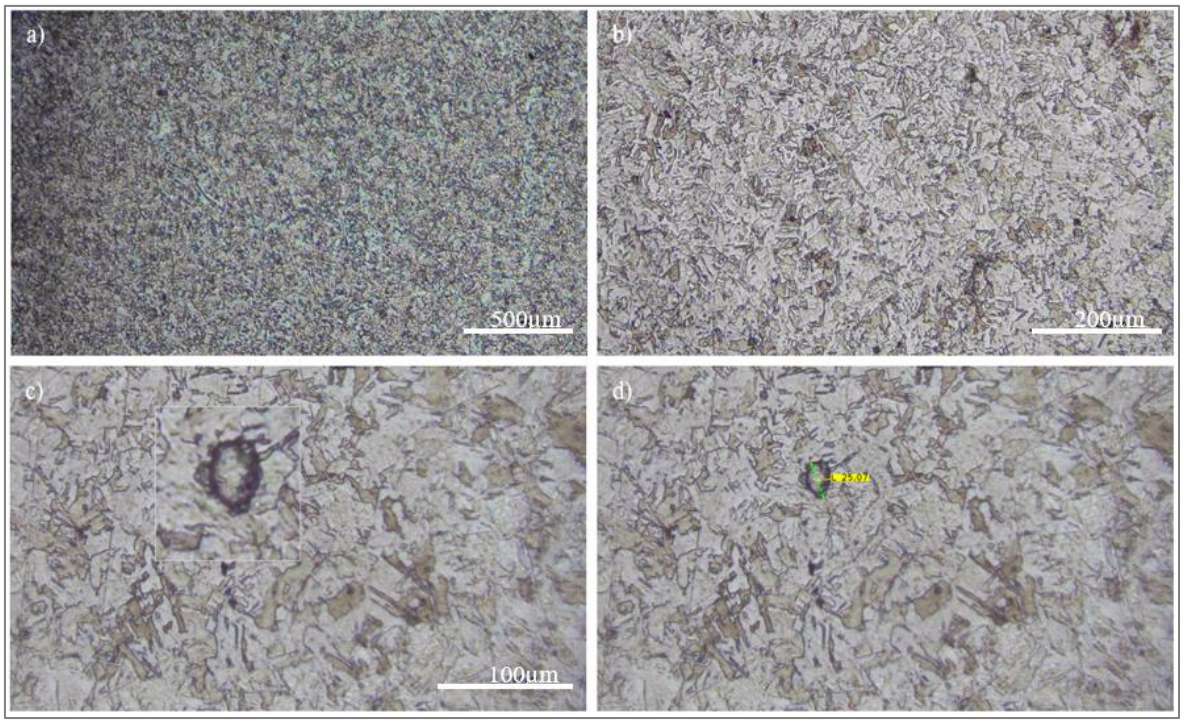
Şekil 3.10. Deney numunelerinin ısıl işlem sürecinin grafiksel gösterimi

3.4. Deney Malzemelerinin Mikroyapı İncelemesi

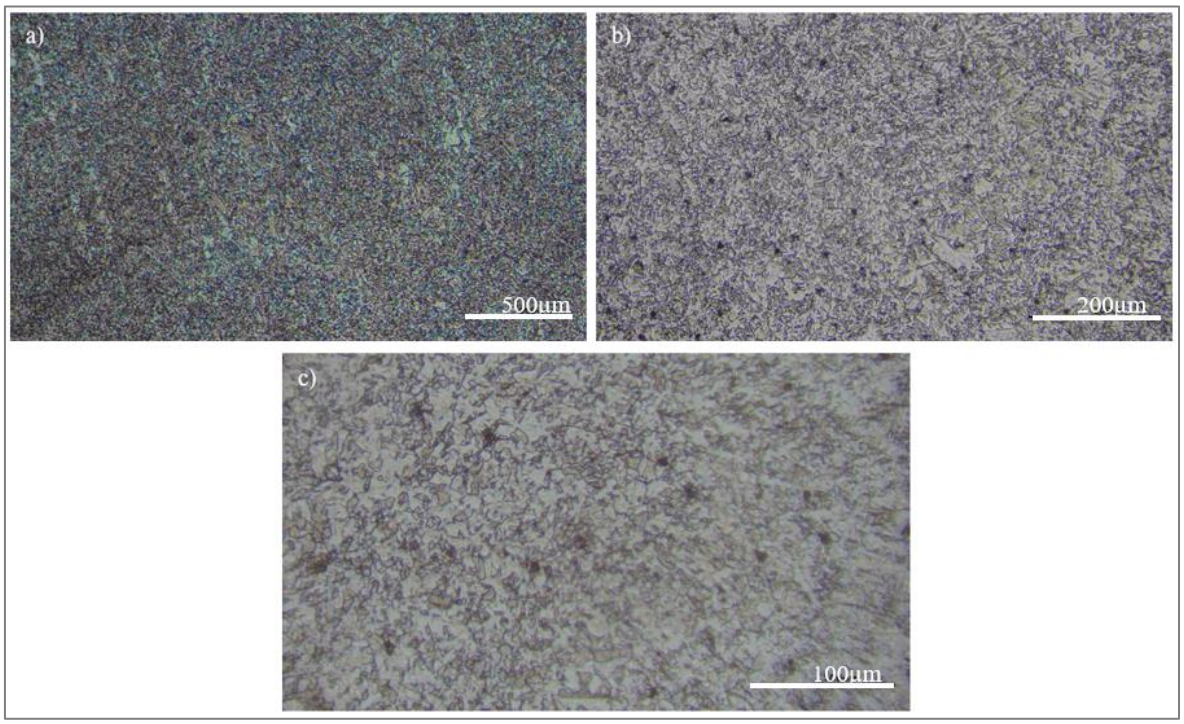
Mikroyapı incelemeleri için deney numunelerinden metalografik hazırlama işlemleri yapılmıştır. İlk aşamada ince numunelere 320 ve 500 grit Silisyum Karbür bazlı zımparalama işlemi uygulanmış, son olarak da 3 mikron elmas solusyon ile mekanik parlatma işlemi yapılmıştır. Etkin ve uygun dağlayıcıyı ve dağlama süresi ile ilgili de pikral (%4 Pikrik asit ($C_6H_3N_3O_7$) ve Etil alkol(C_2H_5OH)), nital (%2-5 arasında Nitrik asit (HNO_3) ve Metanol (CH_3OH)) ve keller (%2 hidrojen florür (HF), %3-6 hidroklorik asit (HCl), %5-10 nitrik asit (HNO_3) ve geri kalan kısmı distile su) bazlı denemeler yapılmış ve denemeler sonucunda en iyi sonucun pikral dağlayıcı ve 90 saniye dağlama süresi ile elde edildiği tespit edilmiştir. Daha sonra numuneler mikroyapı analizleri için parlak alan aydınlatması altında değişik büyütme oranlarında optik mikroskopta incelenmiştir. Malzemenin iç yapısında meydana gelen değişimler ise Nikon Eclipse LV150N optik mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. Tüm yapı oryantasyonlarında üretilen hem as-built hem de kondisyon A ısıl işlemli numuneler için 4x, 10x ve 20x mikroyapı görüntüleri alınmıştır. Bakalit görüntüsü ve incelemelerde kullanılan optik mikroskobun görüntüsü Şekil 3.11'de verilmiştir.



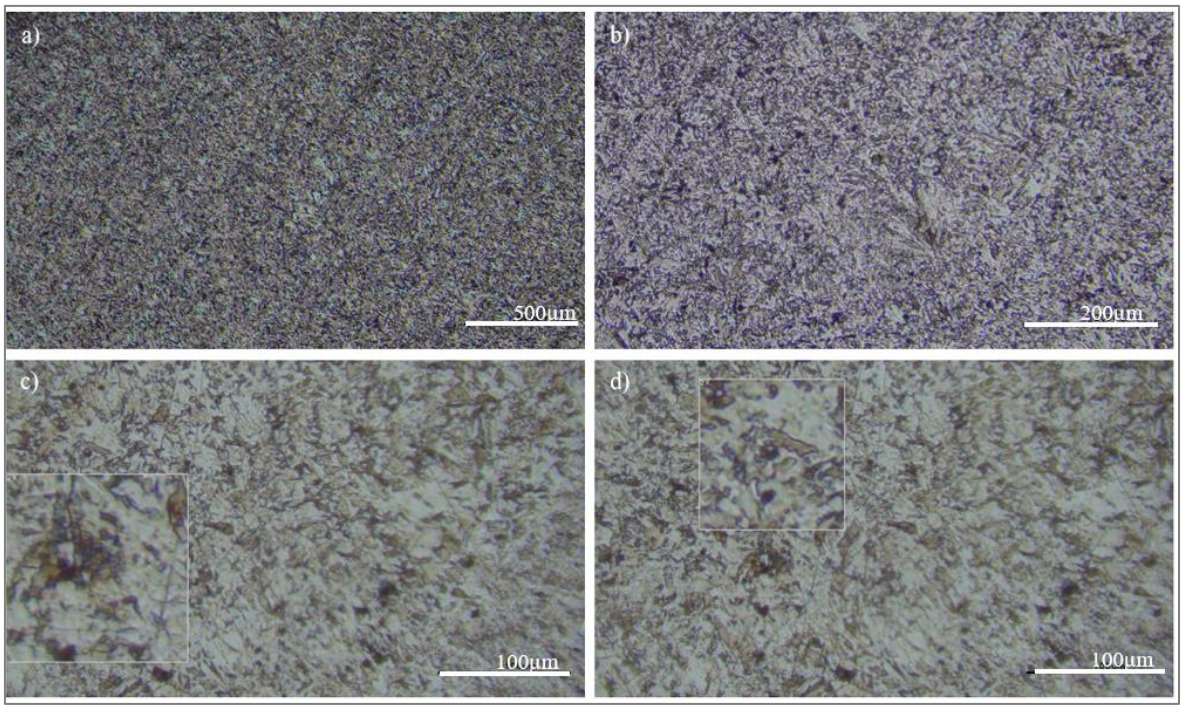
Şekil 3.11. a) Bakalit yapılmış numune b) Optik mikroskop



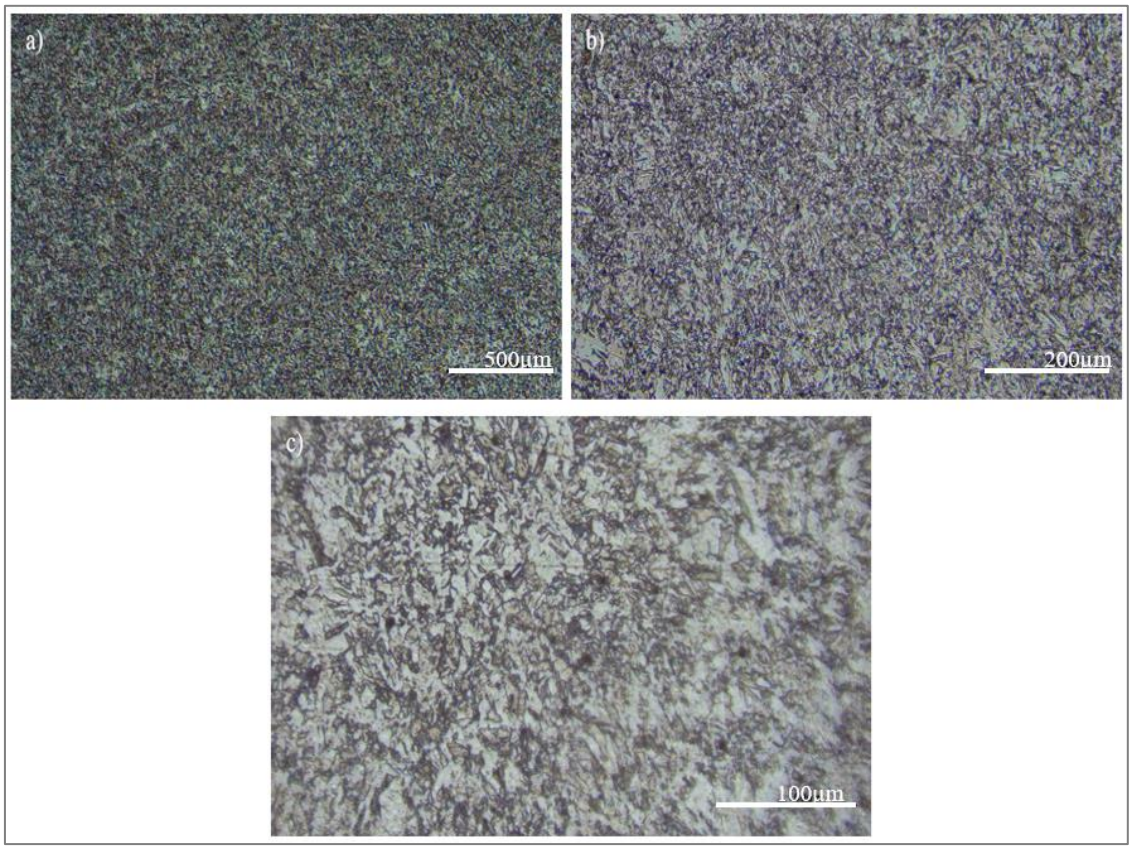
Şekil 3.12. XY düzlemi As-built numune için mikroskobik görüntüleri a) 4x b) 10x c)20x d)20x detay



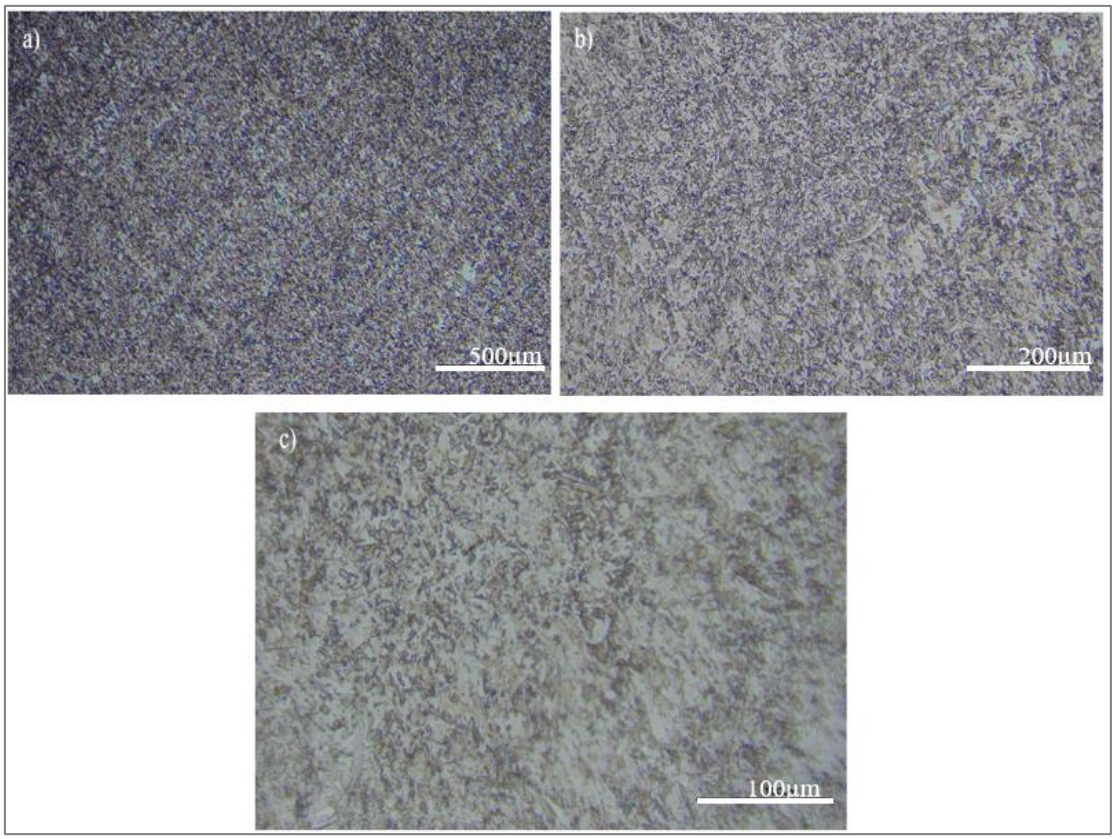
Şekil 3.13. XY düzlemi kondisyon A numune için mikroskobik görüntüleri a) 4x b) 10x c) 20x



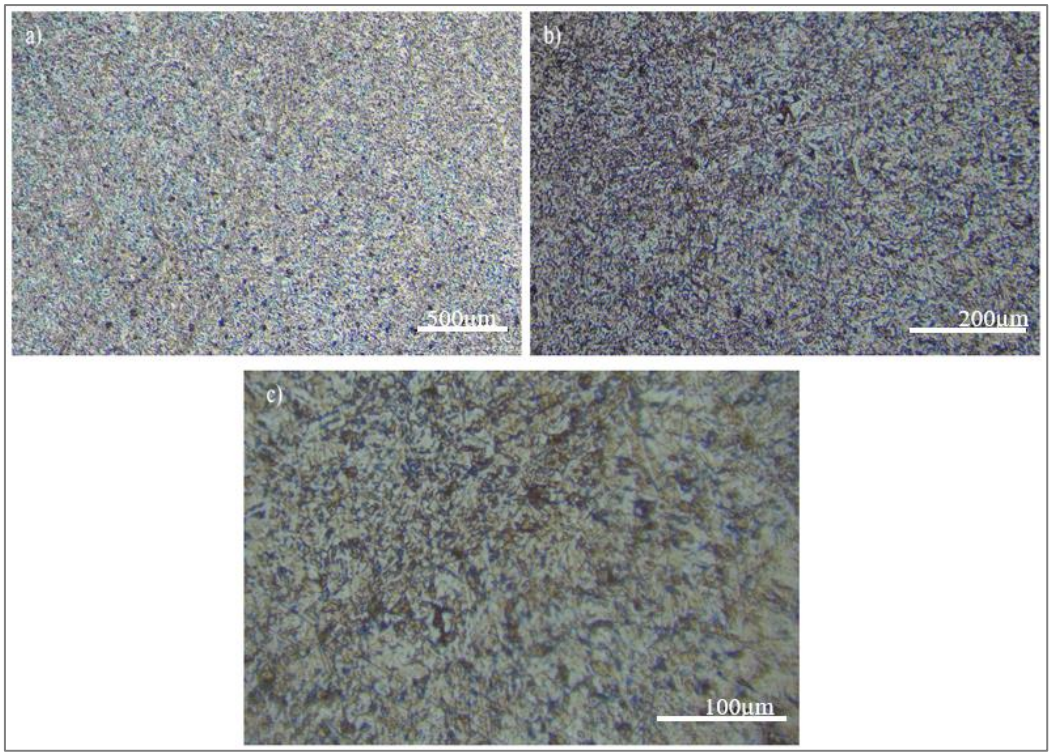
Şekil 3.14. XZ düzlemi As-built numune için mikroskobik görüntüleri a) 4x b) 10x c)20x d)20x detay



Şekil 3.15. XZ düzlemi kondisyon A numune için mikroskobik görüntüleri a) 4x b) 10x c) 20x



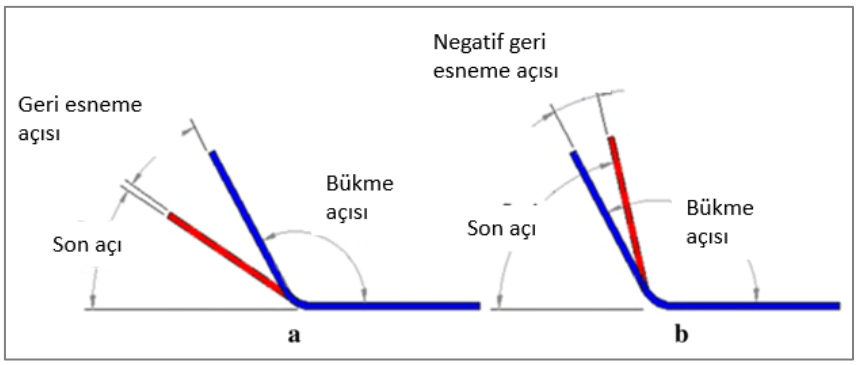
Şekil 3.16. YZ düzlemi As-built numune için mikroskobik görüntüleri a) 4x b) 10x c) 20x



Şekil 3.17. YZ düzlemi kondisyon A numune için mikroskobik görüntüleri a) 4x b) 10x c) 20x

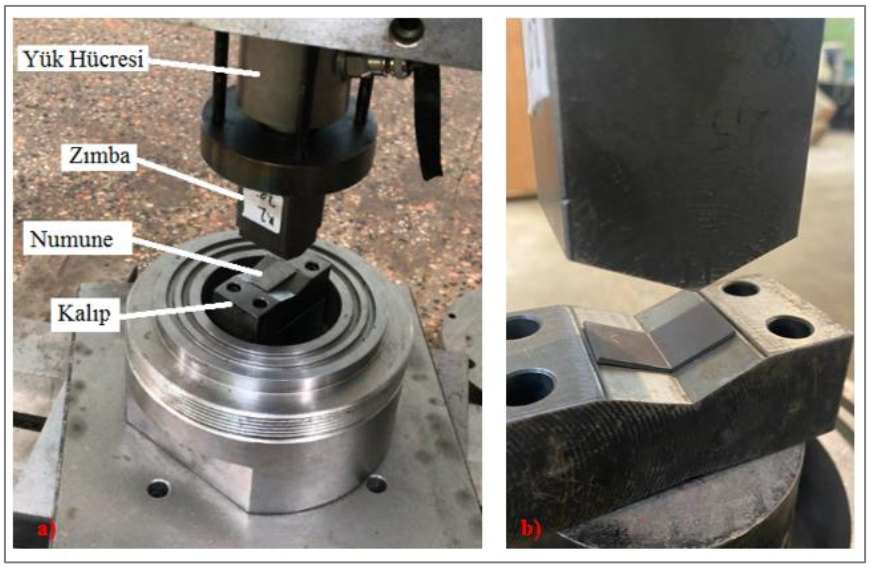
3.5. Geri Esneme Ölçümü

Geri esneme bir metalin şekillendirme işleminde yükün kaldırılması sonrasında artık elastik gerilimler sebebiyle meydana gelen şekil değişikliği olarak tanımlanmaktadır. Malzeme üzerindeki yük kaldırıldığında gerçekleşen şekil değişimi, geri doğru açılma şeklinde ise geri esneme, ileri doğru açılma şeklinde ise negatif geri esneme olarak adlandırılmaktadır [76-79].



Şekil 3.18. Geri esnemenin şematik gösterimi a) Geri esneme. b) Negatif geri esneme/ileri yaylanma [77]

Deneysel çalışmada, malzemelerin deformasyon dayanımlarını gözlemlemek amacıyla bilgisayar kontrollü ve kalibrasyonu yapılmış test düzeneği kullanılarak V-bükme ile şekillendirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada as-built numuneler uç radyusu 0 mm olan zımba ile 45° ve 60° açılarında bükülmüştür. Kondisyon A yaşlandırılan numuneler de uç radyusu 0 mm olan zımba ile 15°- 30° ve 45° açılarında bükülmüştür. Deneysel çalışma ortamı ve kalıpların görüntüsü Şekil 3.19'da gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Deneysel çalışma ortamı ve kalıp grubu görüntüsü

Bükülen numunelerin geri esneme açılarının ölçümü bilgisayar kontrollü koordinat ölçüm cihazı (CMM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri büküm açıları bozulmayacak şekilde bir sac levha malzeme üzerine sabitlenerek hazırlanmıştır. Levha üzerine sabitlenen deney numunelerin geri esnemesinin ölçümde CMM probu ile malzemenin bir yüzeyine 3 farklı noktadan temas edilerek bir düzlem elde edilmiştir. Daha sonra, aynı işlem şekillendirilmiş parçanın diğer yüzeyine uygulanmış ve ikinci düzlem elde edilmiştir. Geri esneme açısı elde edilen iki düzlem arasındaki açıdan kalıp açısının çıkarılmasıyla elde edilmiştir. CMM cihazı ile gerçekleştirilen ölçümler Şekil 3.20'de verilmiştir.



Şekil 3.20. CMM ile geri esneme açılarının ölçümü

Ölçülen sertlik değerlerinin kondisyon A için önerilen ASTM A564 standardına uygun olduğu tespit edilmiş ve ısıl işlemin uygulamasının başarılı olduğu tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan numunelere ait bilgiler Çizelge 3.4'te verilmiştir.

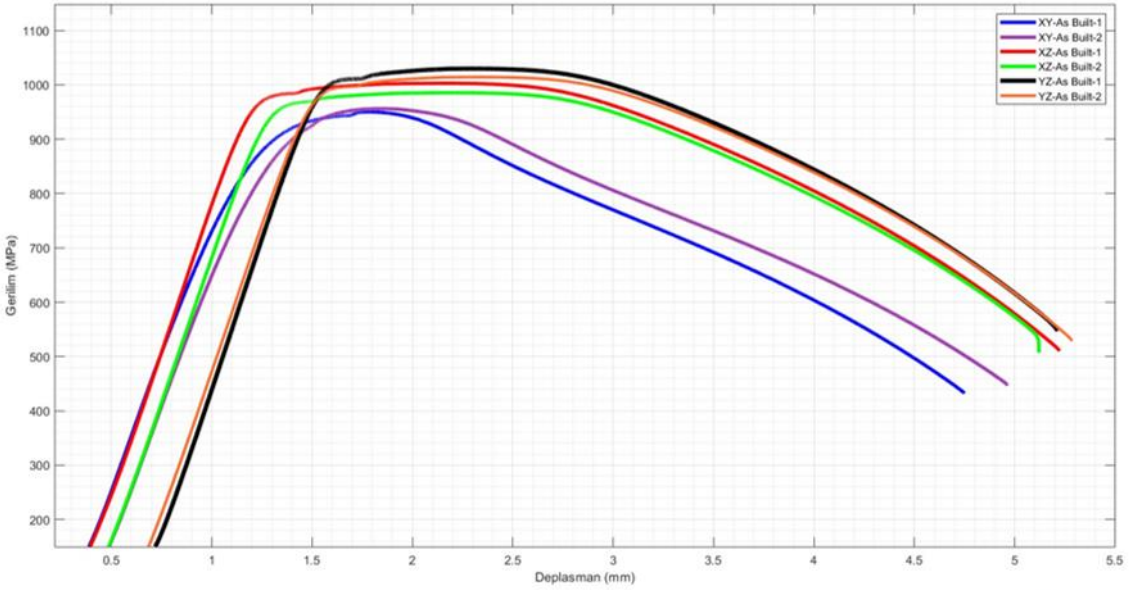
Çizelge 3.3. Numunelere ait detay bilgi

	Oryantasyon			Isıl İşlem
	XY	XZ	YZ	
Çekme Numunesi	XY1-Ç	XZ1-Ç	YZ1-Ç	Kondisyon A
	XY2-Ç	XZ2-Ç	YZ2-Ç	Kondisyon A
	XY3-Ç	XZ3-Ç	YZ3-Ç	As-built
	XY4-Ç	XZ4-Ç	YZ2-Ç	As-built
Dikdörtgen Prizması	XY1-D	XZ1-D	YZ1-D	Kondisyon A
	XY2-D	XZ2-D	YZ2-D	Kondisyon A
	XY3-D	XZ3-D	YZ3-D	Kondisyon A
	XY4-D	XZ4-D	YZ4-D	As-built
	XY5-D	XZ5-D	YZ5-D	As-built

4. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

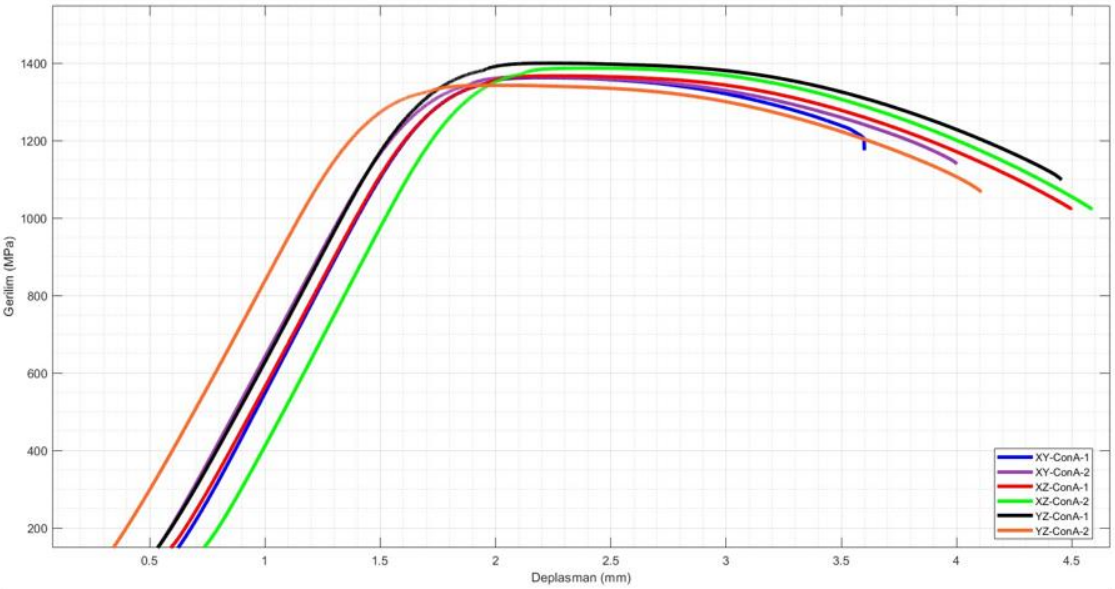
4.1. Yapı Oryantasyonuna Göre Mekanik Test Sonuçları

Bu çalışmada, ısıl işlemin 17-4 PH çeliğin yapı oryantasyonuna göre mekanik özelliklerindeki değişimleri metalurjik testler ile araştırılmıştır. Isıl işlemin etkisini gözlemlemek amacıyla ayrıca üç farklı yapı oryantasyonunda üretilen deney numuneleri kondisyon A ısıl işlemine de tabi tutulmuştur. Malzemede meydana gelen mekanik değişimlerin belirlenmesi için gerçekleştirilen çekme testi sonuçları as-built numuneler için Şekil 12'de, ısıl işlem uygulanmış numuneler için de Şekil 4.1'de verilmiştir.



Renk Kodu	Numune Adı	$R_{p0.2}$ Mpa	R_m Mpa	d_0 mm	L_c mm	L_0 mm	L_u mm	Uzama %	Test Hızı %/min	Hız, Young's Modülü Mpa/s	Hız, Akma Dayanımı Mpa/s
	XY-As Built-1	849	950	5,95	43,5	30	34,34	14,5	10	30	15
	XY-As Built-2	852	956	6,01	43,5	30	34,4	14,7			
	XZ-As Built-1	976	1000	5,94	43,5	30	34,38	14,6			
	XZ-As Built-2	958	986	5,94	43,5	30	32,7	9,0			
	YZ-As Built-1	1000	1030	6,0	43,5	30	33,52	11,7			
	YZ-As Built-2	988	1010	5,93	43,5	30	32,89	9,6			

Şekil 4.1. Yapı oryantasyonlarına göre as-built numunelerin çekme test sonuçları



Renk Kodu	Numune Adı	$R_{p0.2}$ Mpa	R_m Mpa	d_0 mm	L_c mm	L_0 mm	L_u mm	Uzama %	Test Hızı %/min	Hız, Young's Modülü Mpa/s	Hız, Akma Dayanımı Mpa/s
	XY-ConA-1	1300	1360	5,87	43,5	30	31,75	5,8	10	30	15
	XY-ConA-2	1290	1360	5,94	43,5	30	32	6,7			
	XZ-ConA-1	1300	1370	5,93	43,5	30	32,15	7,2			
	XZ-ConA-2	1330	1390	5,87	43,5	30	31,94	6,5			
	YZ-ConA-1	1340	1400	5,92	43,5	30	32,69	9,0			
	YZ-ConA-2	1290	1340	5,99	43,5	30	33	10,0			

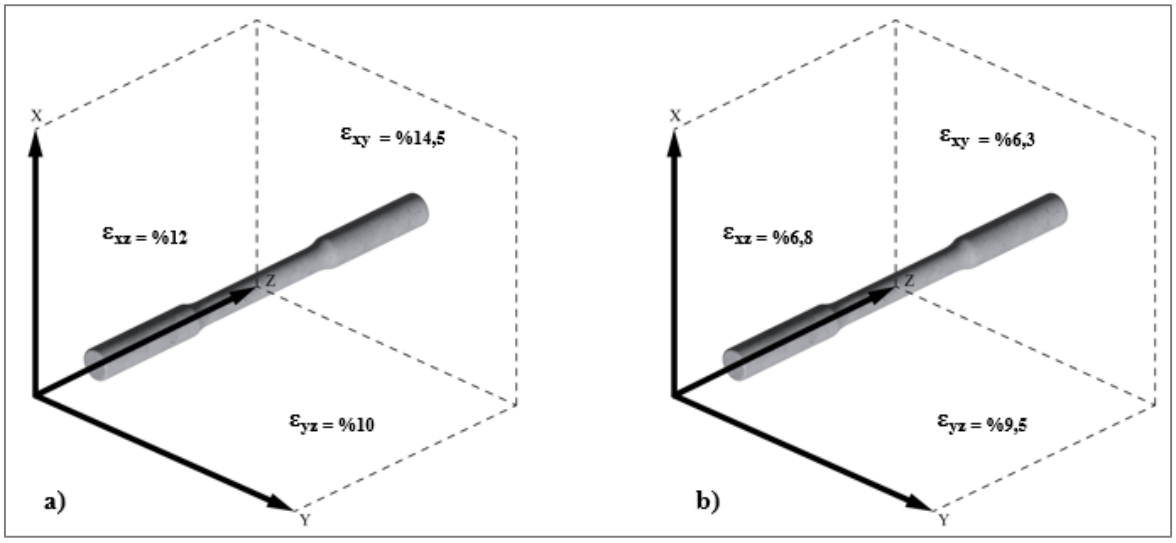
Şekil 4.2. Yapı oryantasyonuna göre kondisyon A numunelerin çekme test sonuçları

Şekil 4.1'de görüldüğü üzere, XY düzleminde SLM yöntemiyle üretilen as-built numunelerde akma dayanımı 850 MPa, maksimum çekme dayanımı 950 MPa, uzama miktarı %14,5±0,2 olarak ölçülmüştür. Ölçülen değerler literatürde yapılan çalışmalarla da benzerlik göstermekte [29-31] ve bazı çalışmalarda da %5 ile %10 arasında sonuçlar farklılaşmıştır [32-35]. XZ düzleminde SLM yöntemiyle üretilen as-built numuneler yapılan çekme test sonucunda da akma dayanımı 965±10 MPa, maksimum çekme dayanımı 992±8 MPa, uzama miktarı %12±3 olarak ölçülmüştür. Ölçülen değerler literatür ile benzerlik göstermekte [36] ancak bazı çalışmalarla da çok az farklılıklar içermektedir [31,32,34]. YZ düzleminde SLM yöntemiyle üretilen as-built numunelerde akma dayanımı 965±10 MPa, maksimum çekme dayanımı 994±6 MPa ve uzama miktarı %10±1,5 olarak ölçülmüştür.

Şekil 4.2'de görüldüğü üzere, yaşlandırma sonucu XY düzleminde üretilen numunelerde ise akma dayanımı 1300±10MPa ve maksimum çekme dayanımı 1360MPa ve uzama miktarı da 6,3%±0,5 olarak ölçülmüştür. XZ düzleminde üretilen numunelerde ise akma dayanımı 1315±15MPa, maksimum çekme dayanımı 1380±10MPa ve uzama miktarı 6,8%±0,5 olarak ölçülmüştür. YZ düzlemindeki numunelerde ise akma dayanımı 1315±25MPa, maksimum

çekme dayanımı 1370±30MPa ve uzama miktarı da 9,5%±0,5 olarak ölçülmüştür. Literatürde yapılan çalışmalarda XY düzlemi içinde YZ düzlemi için akma ve maksimum çekme dayanım özelliklerinde benzer özellikler gözlemlenmiştir [37,38,39]. Ancak başka bir literatürde negatif yönde farklılık göstermektedir [40]. Bu durum uygulanan kuvvetin yönünden dolayı oluştuğu gözlemlenmiştir.

As-built ve ısıl işlemli parçalara ait uzama verileri Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Deney numunelerine ait uzama verileri a) As-built numuneler b) Kondisyon A ısıl işlemli numuneler

Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen 17-4 PH paslanmaz çeliğin sertliği, yapı oryantasyonu ve uygulanan ısıl işlemle önemli ölçüde değişmektedir. Kondisyon A uygulanan numunelerde, malzemenin martenzitik yapısının ve yaşlandırma sertleştirmesinin daha düzgün bir yapı oluşturması ve iç gerilmeleri gidermesi, sertliğin artmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, kondisyon A numunelerde sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Özellikle YZ ve XZ yönlerinde 38,8 HRC yüksek değerler, bu yapı oryantasyonlarında malzemenin kristal yapısının ve lazer tarama stratejisinin, daha homojen bir martenzitik yapı oluşturduğunu göstermektedir. As-built numunelerde ise, iç gerilmeler ve düzensiz mikroyapı, daha düşük sertlik XY 29,7 HRC ve XZ/YZ 25,1 HRC ile sonuçlanmaktadır (Çizelge 4.1). XY yönünde as-built olarak üretilen malzemenin diğer iki yöne göre nispeten daha yüksek sertlik göstermesi, bu yönde daha iyi bir katman birleştirme ve daha düşük oranda yapısal çatlak oluşumuna sebep olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.1. As-built ve kondisyon A'ya ait sertlik ölçüm değerleri

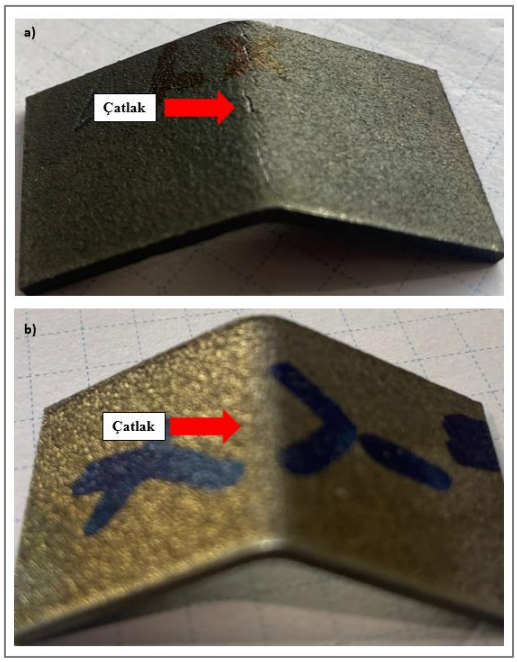
	Oryantasyon			
	XY	XZ	YZ	Isıl İşlem
	XY-A	XZ-A	YZ-A	Kondisyon A
Sertlik (HRC)	37,6	38,8	38,8	
	XY	XZ	YZ	As-built
Sertlik (HRC)	29,7	25,1	25,1	

4.2. Deformasyon Dayanımın Sonuçları

Deneysel çalışma parametrelerinin deformasyon dayanımlarına etkileri de deneysel incelenmiştir.

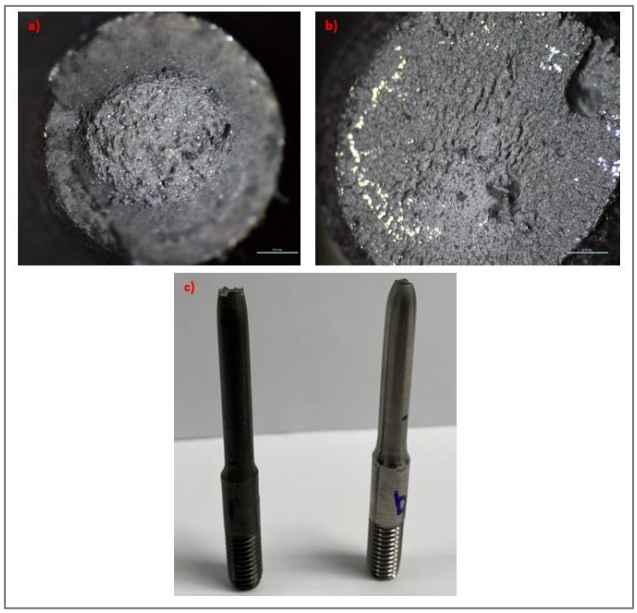
As-built numuneler için deformasyon dayanımları, ısıl işlemli numunelere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. As-built numuneler herhangi bir çatlama ve kırılma gibi şekillendirme kusuru olmadan 60° bükme açısına kadar sorunsuz şekillendirilebilirken, kondisyon A ısıl işlemli numuneler ise maksimum 45° bükme açısına kadar kusursuz şekillendirilebilmiştir. As-built numunelerde 60° açısından sonra çatlak oluşumu, kondisyon A numunelerde ise 45° açısından sonra çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Numunelerde oluşan çatlak oluşumlarının görüntüsü Şekil 4.4'de verilmiştir.

As-built numunelerde, kalıp açısı arttıkça negatif geri esnemenin arttığı, yapı oryantasyonundaki değişimlerin geri esneme değerlerini de etkilediği; XY düzlemden XZ düzleme geçişte ve XZ düzlemden YZ düzleme geçişte geri esnemenin negatif yönde arttığı Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Isıl işlemli numunelerde ise, geri esnemenin kalıp açısındaki artışla azalıp tekrar eksi yöne döndüğü, ancak XY düzlemden XZ ve YZ düzlemine geçişte mekanik özelliklerdeki değişime bağlı olarak geri esneme değerlerinin arttığı, XZ'den YZ'ye geçişte ise farkın az olduğu Şekil 4.6'da gösterilmektedir.

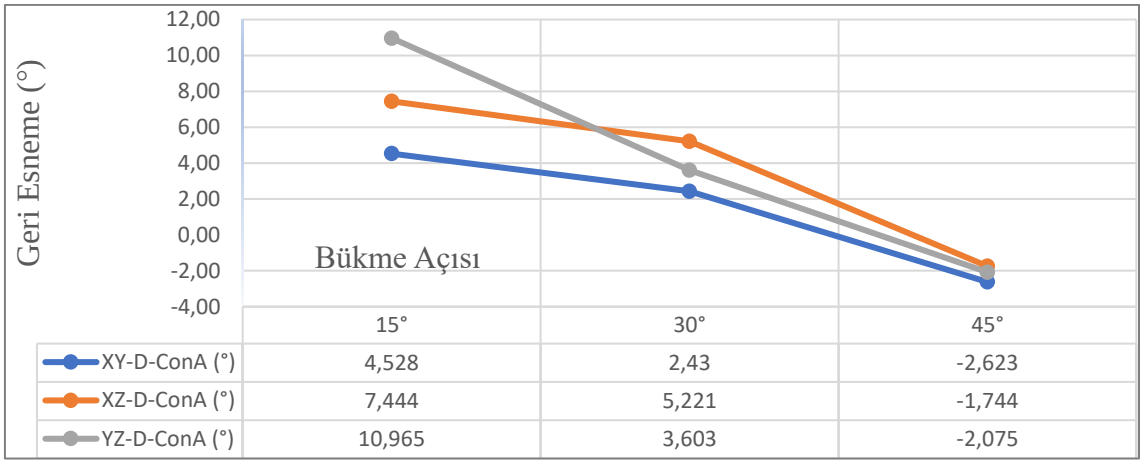


Şekil 4.4. a) 45° bükülmüş ısıl işlemli numune b) 60° bükülmüş As-built numune

Optik görüntüleme ile yapılan incelemeler sonucunda, çekme testi ve görsel muayene, as-built numunelerin sünek, yaşlandırılmış numunelerin ise gevrek kırılma yüzeylerine sahip olduğunu göstermektedir; bu farklılıklar, Şekil 4.5'te sunulan optik görüntülerle desteklenmektedir.

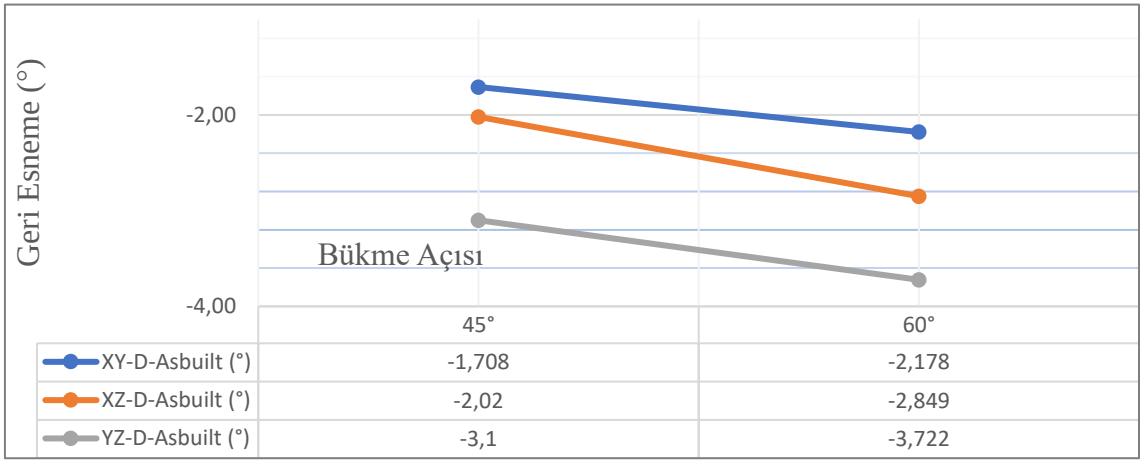


Şekil 4.5. Optik görüntüleme a) As-built numune, b) Yaşlandırılmış numune, c) Optik görüntüleme alınan numuneler



	15°	30°	45°
XY-D-ConA (°)	4,528	2,43	-2,623
XZ-D-ConA (°)	7,444	5,221	-1,744
YZ-D-ConA (°)	10,965	3,603	-2,075

Şekil 4.6. Yapı oryantasyonuna göre ısıl işlemli numunelerin bükme açısı ve ölçülen açı



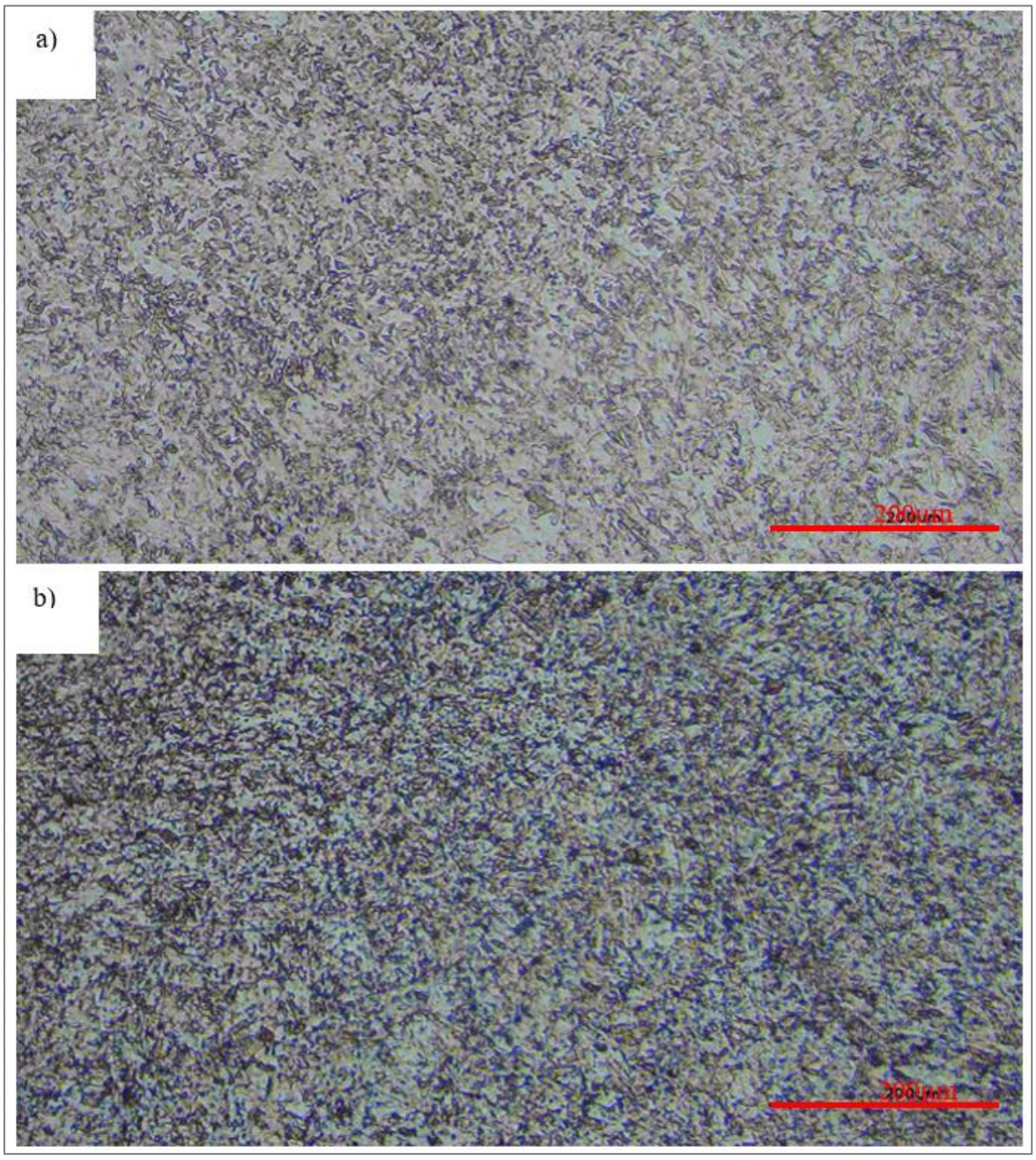
	45°	60°
XY-D-Asbuilt (°)	-1,708	-2,178
XZ-D-Asbuilt (°)	-2,02	-2,849
YZ-D-Asbuilt (°)	-3,1	-3,722

Şekil 4.7. Yapı oryantasyonuna göre as-built numunelerin bükme açısı ve ölçülen açı

4.3. Mikroyapı İnceleme Sonuçları

Deney numunelerinin mikroyapı incelemesiyle numunelerin mikroyapısının baskın bir şekilde martensit ve kalıntı östenit ihtiva ettiği gözlemlenmektedir. Kalıntı östenitin hacimsel oranı tozun özellikleri veya kullanılan koyucu gazın çeşidine göre ciddi oranda değişebilmektedir. SLM prosesinde daha yüksek katılaşma ve soğuma hızları, yarı kararlı olan östenitin daha yoğun olarak oluşmasına ve dolaylı olarak martensit oluşumunun baskılanmasına yol açmaktadır [46]. Hacimsel oran olarak %20'ye kadar kalıntı östenit içeren ve SLM prosesi ile üretilen 17-4 PH malzemelerde literatürde raporlanmıştır [47]. Tez çalışmasında, kalıntı östenitin hacim oranının özellikle ısıl işlemsiz numunelerde yüksek olduğu gözlemlenmiştir ve bu durum, yüksek büyütmelerde daha belirgin hale gelmektedir. Isıl işlem uygulandıktan sonra, kalıntı östenit miktarının oransal olarak azaldığı tespit

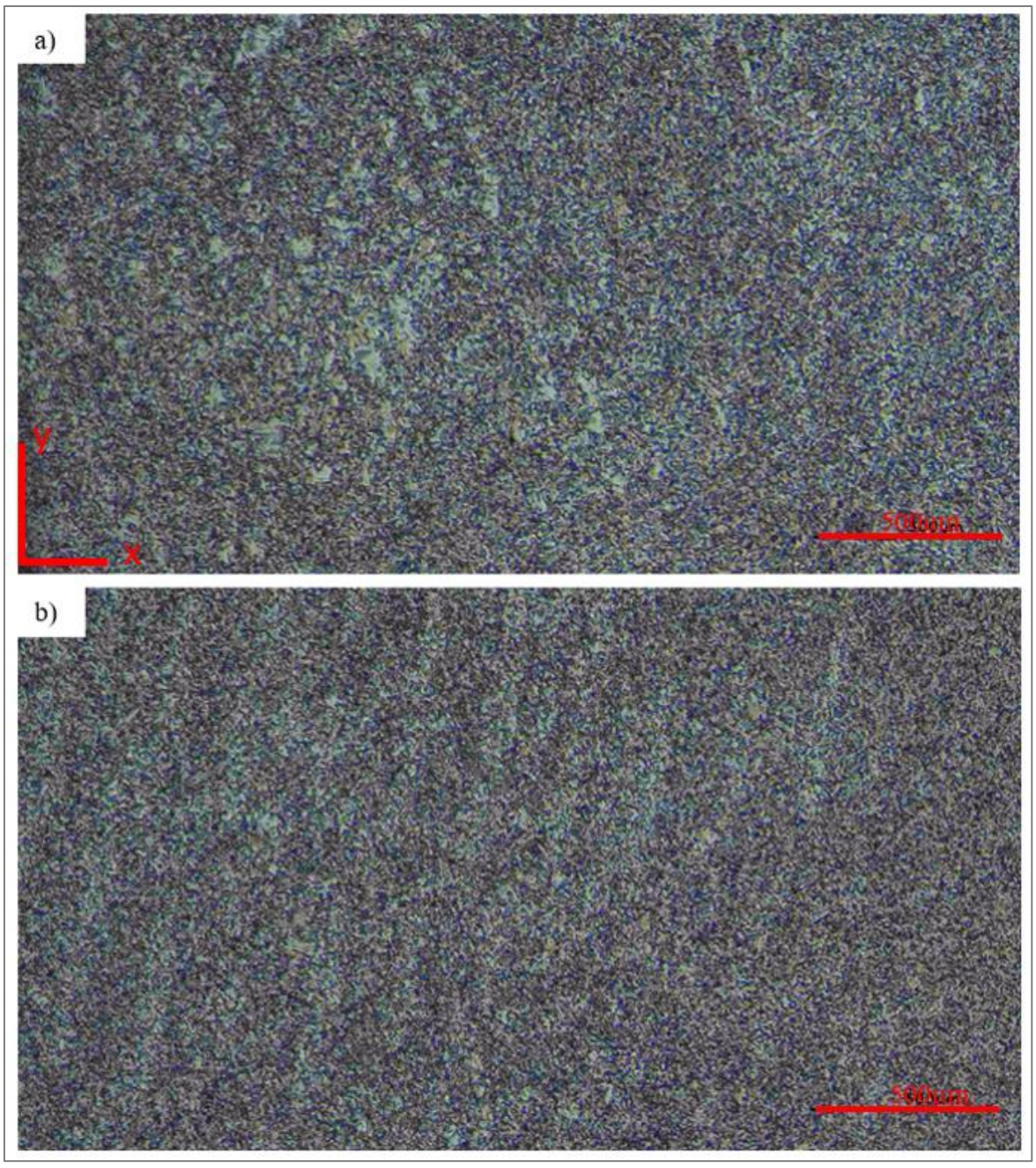
edilmiştir (Şekil 4.8). Isıl işlem, kalıntı östenitin yüksek sıcaklıkta homojenize olmasını ve martenzite dönüşümünü tetikleyerek, ısıl işlem sonrası numunelerde mukavemet artışına neden olmaktadır.



Şekil 4.8. a) XY düzlemi as-built numune optik mikroskop görüntüsü (x10) b) XY düzlemi ısıl işlemli numune optik mikroskop görüntüsü (x10)

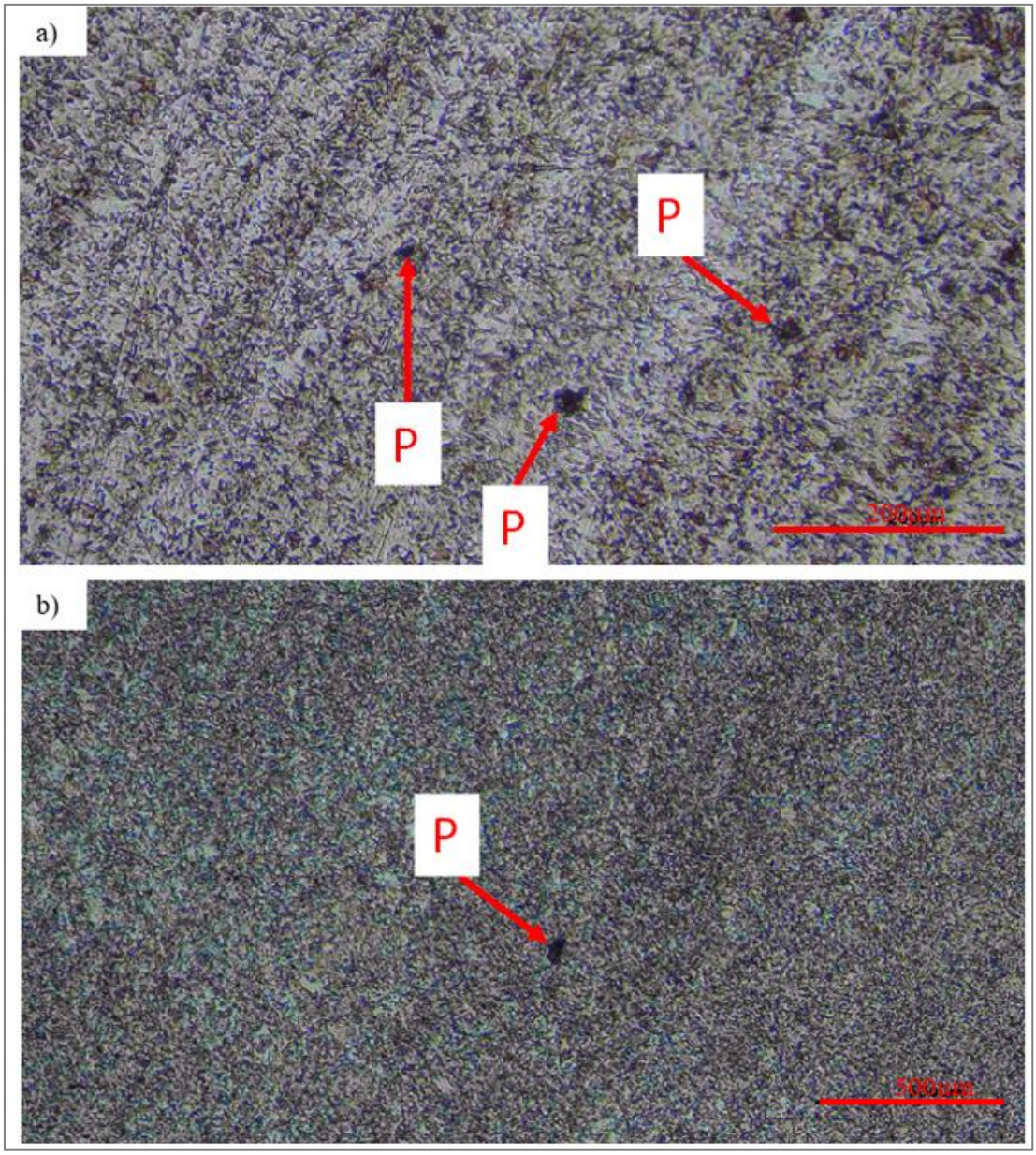
Ayrıca mikroyapı analizlerinden XY düzlemindeki numunelerde az da olsa belirgin bir yönelim gözlemlenmiştir. Biraz daha detay vermek gerekirse özellikle kalıntı östenit bölgelerinde Y yönünde uzamış tanecik yapıları belirgin olduğu tespit edilmiştir. Bu yapı

eklemeli imalat alanında özellikle sütunlu kristal yapısı (columnar type crystallography) olarak sıkça gözlemlenmektedir. Tanecik yönlenmesi bir diğer değişle mikro yapıdaki doku oluşumu (texture formation) ısı girdisinin belirli bir yönde oluşması ile ilgilidir. Eklemeli imalat sürecinde de bazı özel durumlarda ısı girdisi belirli bir yönde (anizotoripk) oluştuğu için tanecik yapısının da bu yönde baskın hale gelmesi gözlemlenmektedir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. a) XY düzlemi kalıntı östenit adacıklarında yönlenme (x4) b) XY düzlemi kalıntı östenit adacıklarında yönlenme (x4)

Doku oluşumu malzemeye bir homojenizasyon ısıl işlemi uygulanmadığı için de ısıl işlem sonrası da gözlemlenebildiği tespit edilmiştir. Eklemeli imalat prosesinde taneciklerin yönelimi; katılaşma oranı, sıcaklık dağılımı vb. birçok etkene bağlı olmaktadır. Fakat en baskın etki olarak sıcaklık dağılımının belirli bir yönde olmasının tanecik yapısını da yönlendirdiği, bir başka değişle mikroyapıda bir anizotropi oluşturduğu literatürde de belirtilmiştir. SLM yönteminde de tek yönlü uzamış tanecikler (columnar grains) dominant bir içyapı oluşumu [48] bu çalışmada da gözlemlenmiştir. Optik mikroskop görüntülerinde ayrıca porozite yapılar da gözlemlenmiştir (Şekil 4.10). Porozite yapı yoğunluğunun XY düzlemde daha az olduğu belirlenirken XZ düzlemde daha fazla olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.10. a) XZ düzlemi porozite yapılar (x10) b) XY düzlemi porozite yapılar (x10)

Porozite yapıları çoğunlukla nodüler (küresel) geometride bulunmaktadır. Porozitelerin gerek eksik füzyon gerekse çöküntü vb. nedenlerle oluşabildiği literatürde daha önce belirtilmiştir [48]. Eksik füzyon nedeniyle, mevcut optik mikrograflarda birbirinden mekansal olarak bağımsız ve bağlantısız porozite yapıları tespit edilmiştir; bu yapıların maksimum çapı yaklaşık 30 mikron olarak ölçülmüştür.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, üç farklı yapı oryantasyonunda SLM yöntemiyle üretimi yapılan 17-4 PH paslanmaz çelik malzemeye uygulanan ısıl işlemin malzemenin mekanik özelliklerine, mikro yapısına ve deformasyon dayanımına olan etkileri deneysel incelenmiştir. As-built ve Kondisyon A ısıl işlemli numuneler kullanılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, As-built ve Kondisyon A numunelerinin mekanik özelliklerinin tespiti için çekme testi ve sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deformasyon dayanımlarının tespiti için de 15°- 45° ve 60° sahip V bükme kalıplarında deney numuneleri deformasyona maruz bırakılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Yapı oryantasyonunun mekanik özellikleri önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir. As-built numunelerde XY düzlemde akma gerilmesi ortalama 850 MPa, çekme gerilmesi 950 MPa ve yüzde uzama ortalama %14,6 elde edilmiştir. XZ düzleminde akma gerilmesi ortalama 969 MPa'a yükselirken çekme gerilmesi ortalama 993 MPa'a yükselmiş ancak yüzde uzama ortalama %11,8'e düşmüştür. YZ düzleminde ise akma gerilmesi ortalama 994 MPa'a maksimum çekme ise ortalama 1020 MPa'a yükselmiş ancak yüzde uzama ortalama %10,65'e düşmüştür. Bu belirgin artışların eklemeli imalat ile üretilen ürünlerde mekanik özellikleri dayanım açısından arttırdığı ancak esneme kabiliyeti ve uzama miktarı açısından olumsuz etki oluşturduğu tespit edilmiştir. Bu durumun, malzemenin artan dayanımı ile birlikte daha az deformasyona uğrayarak kırılmasına neden olmakta, bu da uzamayı sınırlamaktadır.
2. Yapı oryantasyonunun kondisyon A'ya getirilmiş ısıl işlemli parçalar içinde mekanik özelliklerde önemli değişimlere neden olduğu tespit edilmiştir. Kondisyon A ısıl işlemden dolayı mekanik özelliklerin yanı sıra uzama ve esneme kabiliyetinde de önemli ölçüde artmaya neden olduğu gözlemlenmiştir. Isıl işlemli numunelerde XY'de akma dayanımı ortalama 1295 MPa iken XZ düzleminde akma dayanımı ortalama 1315 MPa'a artmış, YZ düzleminde ise ortalama 1315 MPa değerinde devam etmiştir. Özellikle yüzde uzamanın XY düzlemindeki %6,25'ten XZ düzleminde %6,85'e artmış ve YZ düzleminde ise %9,5'e artış olmuştur.
3. Yapı oryantasyonu ve ısıl işlemin deformasyon dayanımına da önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir. As-built numunelerin en fazla 60° açıya kadar kusursuz şekillendirilebildiği gözlemlenirken, ısıl işlemli numunelerin en fazla 45° açıya kadar

kusursuz şekillendirilebildiği tespit edilmiştir. Bu durum ısıl işlem ile birlikte malzemede gevrekliğin artması ve mekanik özelliklerdeki artıştan kaynaklanmaktadır.

4. Deneysel çalışmalarda başarı ile şekillendirilen numunelerde bir şekillendirme kusuru olan geri esneme davranışı da tespit edilmiştir. As-built numunelerde kalıp açısı arttıkça negatif geri esnemenin arttığı, ısıl işlemli numunelerde ise geri esnemenin kalıp açısındaki artışa bağlı olarak azalıp eksi yönde artmaya başladığı gözlemlenmiştir. Ancak artan mukavemet değerlerine bağlı olarak geri esneme açılarının ısıl işlemli numunelerde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yapı oryantasyonundaki değişimlerin geri esneme değerini de değiştirdiği gözlemlenmiştir. As-built numunelerde XY düzlemden XZ düzleme geçişte ve XZ düzlemden de YZ düzleme geçişte geri esnemenin negatif yönde arttığı gözlemlenmiştir. Isıl işlemli numunelerde de XY düzlemden XZ düzleme geçişte ve XZ düzlemden de YZ düzleme geçişte de geri esnemenin arttığı tespit edilmiştir. Ancak XZ düzlemden YZ düzleme geçişte geri esneme değerlerindeki değişimin mekanik özelliklerdeki değişimin az olmasından dolayı farkın çok az olduğu da gözlemlenmiştir.
5. Mikroyapı analizi sonucunda, deney numunelerinin mikroyapısının baskın olarak martensit ve kalıntı östenit fazlarından oluştuğu tespit edilmiştir. Kalıntı östenitin hacimsel oranının, malzemenin işlem parametrelerine, özellikle kullanılan toz ve koruyucu gaz türüne bağlı olarak değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Eklemeli imalat prosesi, yüksek katılaşma ve soğuma hızlarıyla, daha fazla yarı kararlı östenit fazının oluşumuna ve dolayısıyla martensit dönüşümünün baskılanmasına yol açmaktadır. Isıl işlem uygulanmamış numunelerde yüksek oranda bulunan kalıntı östenit, ısıl işlem sonrası martensite dönüşerek malzemenin mukavemetini artırmaktadır. Ayrıca, XY düzleminde gözlemlenen yönelim, özellikle kalıntı östenit yapısı içerisinde belirginleşmiştir. Eklemeli imalatta tanecik yöneliminin ve sıcaklık dağılımının belirli bir yönde olması, mikroyapıda anizotropiye neden olmuştur. Tek yönlü uzamış taneciklerin (columnar grains) varlığı ve porozite yapılarının yoğunluğu, numunelerin içyapısındaki önemli faktörler olarak saptanmış, porozitelerin genellikle nodüler geometriye sahip olduğu ve eksik füzyon kaynaklı oluştuğu gözlenmiştir. Porozite yapılarının maksimum çapı yaklaşık 30 mikrometre olarak ölçülmüştür.

KAYNAKLAR

1. Mahmoudi, M., Elwany, A., Yadollahi, A., Thompson, S. M., Bian, L., and Shamsaei, N. (2017). Mechanical properties and microstructural characterization of selective laser melted 17-4 PH stainless steel. *Rapid Prototyping Journal*, 23(2), 280-294.

2. Sabooni, S., Chabok, A., Feng, S. C., Blaauw, H., Pijper, T. C., Yang, H. J., and Pei, Y. T. (2021). Laser powder bed fusion of 17–4 PH stainless steel: A comparative study on the effect of heat treatment on the microstructure evolution and mechanical properties. *Additive Manufacturing*, 46, 102176.

3. Yadollahi, A., Shamsaei, N., Thompson, S. M., Elwany, A., and Bian, L. (2015, 13-19 November). *Mechanical and microstructural properties of selective laser melted 17-4 PH stainless steel.* Paper presented at the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Houston, Texas, USA, 57359.

4. Yadollahi, A., Shamsaei, N., Thompson, S. M., Elwany, A., and Bian, L. (2017). Effects of building orientation and heat treatment on fatigue behavior of selective laser melted 17-4 PH stainless steel. *International Journal of Fatigue*, 94(2), 218-235.

5. Hsu, T. H., Chang, Y. J., Huang, C. Y., Yen, H. W., Chen, C. P., Jen, K. K., and Yeh, A. C. (2019). Microstructure and property of a selective laser melting process induced oxide dispersion strengthened 17-4 PH stainless steel. *Journal of Alloys and Compounds*, 803(14), 30-41.

6. Weaver, J. S., Whiting, J., Tondare, V., Beauchamp, C., Peltz, M., Tarr, J., and Donmez, M. A. (2021). The effects of particle size distribution on the rheological properties of the powder and the mechanical properties of additively manufactured 17-4 PH stainless steel. *Additive manufacturing*, 39(10), 101851.

7. Yu, Z., Chai, Z., Yu, C., Chen, J., Xu, J., and Lu, H. (2022). Microstructural evolution and mechanical behavior of additive manufactured 17-4 PH steel with a periodic layer structure. *Materials Science and Engineering: A*, 849(7), 143527.

8. Ponnusamy, P., Sharma, B., Masood, S. H., Rashid, R. R., Rashid, R., Palanisamy, S., and Ruan, D. (2021). A study of tensile behavior of SLM processed 17-4 PH stainless steel. *Materials Today: Proceedings*, 45(6), 4531-4534.

9. Irrinki, H., Dexter, M., Barmore, B., Enneti, R., Pasebani, S., Badwe, S., and Atre, S. V. (2016). Effects of powder attributes and laser powder bed fusion (L-PBF) process conditions on the densification and mechanical properties of 17-4 PH stainless steel. *The Journal of The Minerals*, 68(8), 860-868.

10. Tonelli, L., Fortunato, A., and Ceschini, L. (2020). CoCr alloy processed by Selective Laser Melting (SLM): Effect of Laser Energy Density on microstructure, surface morphology, and hardness. *Journal of Manufacturing Processes*, 52(9), 106-119.

11. Bambach, M., Sviridov, A., Weisheit, A., and Schleifenbaum, J. H. (2017). Case studies on local reinforcement of sheet metal components by laser additive manufacturing. *Metals*, 7(4), 113.

12. Yin, D., Gienger, E. B., Croom, B. P., Reider, L. A., Trethewey, B. R., Lark, A. R., and Presley, M. (2023). Variability in mechanical properties of additively manufactured 17-4 PH stainless steel produced by multiple vendors: Insights for qualification. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 128(7-8), 3093-3103.

13. Abdullah, T., Dhami, S. S., and Khan, N. (2021). Experimental study on mechanical behaviour of additively manufactured 17-4 PH stainless steel. *Researchgate*, 23(4), 171-180.

14. Nalli, F., Cortese, L., and Concli, F. (2021). Ductile damage assessment of Ti6Al4V, 17-4PH and AlSi10Mg for additive manufacturing. *Engineering Fracture Mechanics*, 241(1), 107395.

15. Ponnusamy, P., Masood, S. H., Ruan, D., Palanisamy, S., Rahman Rashid, R. A., and Ahmed Mohamed, O. (2017). *Mechanical performance of selective laser melted 17-4 PH stainless steel under compressive loading.* Paper presented at the Solid Freeform Fabrication 2017: Proceedings of the 28th Annual International, Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference. University of Texas at Austin. Texas, USA, 321-331.

16. Cheruvathur, S., Lass, E. A., and Campbell, C. E. (2016). Additive manufacturing of 17-4 PH stainless steel: post-processing heat treatment to achieve uniform reproducible microstructure. *The Journal of The Minerals*, 68(22), 930-942.

17. Yadollahi, A., Shamsaei, N., Thompson, S. M., Elwany, A., Bian, L., and Mahmoudi, M. (2015). *Fatigue behavior of selective laser melted 17-4 PH stainless steel.* Paper presented at the 2015 International Solid Freeform Fabrication Symposium. University of Texas at Austin. Texas, USA, 721-731.

18. Kedziora, S., Decker, T., Museyibov, E., Morbach, J., Hohmann, S., Huwer, A., and Wahl, M. (2022). Strength properties of 316L and 17-4 PH stainless steel produced with additive manufacturing. *Materials*, 15(18), 6278.

19. Li, J., Deng, D., Hou, X., Wang, X., Ma, G., Wu, D., and Zhang, G. (2016). Microstructure and performance optimisation of stainless steel formed by laser additive manufacturing. *Materials Science and Technology*, 32(12), 1223-1230.

20. Ghadimi, H., Jirandehi, A. P., Nemati, S., Ding, H., Garbie, A., Raush, J., and Guo, S. (2023). Effects of printing layer orientation on the high-frequency bending-fatigue life and tensile strength of additively manufactured 17-4 PH stainless steel. *Materials*, 16(2), 469.

21. Dong, D., Wang, J., Chen, C., Tang, X., Ye, Y., Ren, Z., and Zhou, K. (2023). Influence of Aging Treatment Regimes on Microstructure and Mechanical Properties of Selective Laser Melted 17-4 PH Steel. *Micromachines*, 14(4), 871.

22. Nezhadfar, P. D., Shrestha, R., Phan, N., and Shamsaei, N. (2019). Fatigue behavior of additively manufactured 17-4 PH stainless steel: Synergistic effects of surface roughness and heat treatment. *International Journal of Fatigue*, 124, 188-204.

23. Wu, J. H., and Lin, C. K. (2002). Tensile and fatigue properties of 17-4 PH stainless steel at high temperatures. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33(6), 1715-1724.

24. Rafi, H. K., Pal, D., Patil, N., Starr, T. L., and Stucker, B. E. (2014). Microstructure and mechanical behavior of 17-4 precipitation hardenable steel processed by selective laser melting. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(12), 4421-4428.

25. Burns, D. E., Kudzal, A., McWilliams, B., Manjarres, J., Hedges, D., and Parker, P. A. (2019). Investigating additively manufactured 17-4 PH for structural applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(4), 4943-4951.

26. Yoo, W. D., Lee, J. H., Youn, K. T., and Rhyim, Y. M. (2006). Study on the microstructure and mechanical properties of 17-4 PH stainless steel depending on heat treatment and aging time. *Solid State Phenomena*, 118(9), 15-20.

27. Murr, L. E., Gaytan, S. M., Ramirez, D. A., Martinez, E., Hernandez, J., Amato, K. N., and Wicker, R. B. (2012). Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies. *Journal of Materials Science & Technology*, 28(1), 1-14.

28. Murr, L. E., Martinez, E., Hernandez, J., Collins, S., Amato, K. N., Gaytan, S. M., and Shindo, P. W. (2012). Microstructures and properties of 17-4 PH stainless steel fabricated by selective laser melting. *Journal of Materials Research and Technology*, 1(3), 167-177.

29. Ünsal, I., Hama-Saleh, R., Sviridov, A., Bambach, M., Weisheit, A., and Schleifenbaum, J. H. (2018). Mechanical properties of sheet metal components with local reinforcement produced by additive manufacturing. *AIP Conference Proceedings,* 1960(1), 160028.

30. Mower, T. M., and Long, M. J. (2016). Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials. *Materials Science and Engineering: A*, 651(23), 198-213.

31. AlMangour, B., and Yang, J. M. (2016). Improving the surface quality and mechanical properties by shot-peening of 17-4 stainless steel fabricated by additive manufacturing. *Materials & Design*, 110(9), 914-924.

32. Alfarisi, C. D., Rionaldo, H., Fadli, A., Syafna, I., Arianti, L., Lestari, D. L., and Asnila, N. (2023). The effect of acid treatment and sintering temperature on 316L stainless steel substrate coating with hydroxyapatite. *Materials Today: Proceedings*, 87(5), 259-262.

33. Zhang, Z., Zhao, Z., Li, X., Wang, L., Liu, B., and Bai, P. (2022). Effect of heat treatments on metastable pitting of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting. *Journal of Materials Research and Technology*, 21(3), 1903-1914.

34. Zhao, Y., Chen, Y., Wang, Z., Ye, J., and Zhao, W. (2023). Mechanical properties, microstructural characteristics and heat treatment effects of WAAM stainless-steel plate material. *Journal of Building Engineering*, 75(1), 106988.

35. Huang, C. T., Hung, F. Y., Zhao, J. R., and Hsieh, H. Y. (2023). Microstructure and mechanical properties of 631 Stainless Steel: Study of Yield Slip and Strain Rate Mechanism with Austempering and Martempering. *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*, 14(2), 100015.

36. Sarkar, S., Mukherjee, S., Kumar, C. S., and Nath, A. K. (2020). Effects of heat treatment on microstructure, mechanical and corrosion properties of 15-5 PH stainless steel parts built by selective laser melting process. *Journal of Manufacturing Processes*, 50(4), 279-294.

37. Bai, Y., Wang, D., Yang, Y., and Wang, H. (2019). Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of maraging steel by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 760(11), 105-117.

38. Sathyanath, A., and Meena, A. (2020). Microstructural evolution and strain hardening behavior of heat-treated 17-4 PH stainless steel. *Materials Today Communications*, 25(1), 101416.

39. Montero Sistiaga, M. L., Nardone, S., Hautfenne, C., and Van Humbeeck, J. (2016). *Effect of heat treatment of 316L stainless steel produced by selective laser melting (SLM)*. Paper presented at the 2016 International Solid Freeform Fabrication Symposium. University of Texas at Austin. Texas, USA, 558-565.

40. Ziewiec, A., Witkowska, M., and Zielińska-Lipiec, A. (2016). Microstructure and texture evolution in the welded semi-austenitic PH steel after the heat treatment. *Acta Physica Polonica A*, 130(4), 956-959.

41. Amini, K., Hoda, M. R., and Shafyei, A. (2014). Investigation of the effect of heat treatment on the mechanical properties and microstructure of DIN 1.4057 martensitic stainless steel. *Metal Science and Heat Treatment*, 55(9), 499-503.

42. Balan, K. P., Reddy, A. V., and Sarma, D. S. (1998). Austenite precipitation during tempering in 16Cr-2Ni martensitic stainless steels. *Scripta Materialia*, 39(7), 901-905.

43. Bhambroo, R., Roychowdhury, S., Kain, V., and Raja, V. S. (2013). Effect of reverted austenite on mechanical properties of precipitation hardenable 17-4 stainlesssteel. *Materials Science and Engineering: A*, 568(4), 127-133.

44. Fergani, O., Bratli Wold, A., Berto, F., Brotan, V., and Bambach, M. (2018). Study of the effect of heat treatment on fatigue crack growth behaviour of 316L stainless steel produced by selective laser melting. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 41(5), 1102-1119.

45. 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.

46. Hsiao, C. N., Chiou, C. S., and Yang, J. R. (2002). Aging reactions in a 17-4 PH stainless steel. *Materials Chemistry and Physics*, 74(2), 134-142.

47. Jin, H. R., Yang, X. K., and Yi, Y. L. (2017). Comparison of the effect of different heat treatment processes on microstructure and mechanical properties of stainless steel clad plate. *Strength of Materials*, 49(3), 93-100.

48. LeBrun, T., Nakamoto, T., Horikawa, K., and Kobayashi, H. (2015). Effect of retained austenite on subsequent thermal processing and resultant mechanical properties of selective laser melted 17–4 PH stainless steel. *Materials & Design*, 81(9), 44-53.

49. Nakagawa, H., Miyazaki, T., and Yokota, H. (2000). Effects of aging temperature on the microstructure and mechanical properties of 1.8 Cu-7.3 Ni-15.9 Cr-1.2 Mo-low C, N martensitic precipitation hardening stainless steel. *Journal of Materials Science*, 35(9), 2245-2253.

50. Ning, L., Zhonggang, D., and Menggen, H. (1991). Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of martensitic–ferritic stainless steel containing 17% Cr and 2% Ni. *Materials science and technology*, 7(11), 1057-1062.

51. Viswanathan, U. K., Banerjee, S., and Krishnan, R. (1988). Effects of aging on the microstructure of 17-4 PH stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 104(13), 181-189.

52. Wang, J., Zou, H., Li, C., Peng, Y., Qiu, S., and Shen, B. (2006). The microstructure evolution of type 17-4PH stainless steel during long-term aging at 350° C. *Nuclear Engineering and Design*, 236(24), 2531-2536.

53. Wu, J. H., and Lin, C. K. (2005). Effect of strain rate on high-temperature low-cycle fatigue of 17-4 PH stainless steels. *Materials Science and Engineering: A*, 390(1-2), 291-298.

54. Yang, F., Zhu, D., Jiang, M., Liu, H., Guo, S., Wang, Q., and Hou, J. (2022). Effect of heat treatment on the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of selective laser melted 304L stainless steel. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 35(10), 1688-1702.

55. Ragai, I., and Nemes, J. A. (2010, October 12–15). *Springback in sheet metal forming of stainless steel 410*. Paper presented at the ASME 2010 International Manufacturing Science and Engineering Conference. Pennsylvania, USA, 49477, 15-22.

56. Lade, J., Singh, S. K., Banoth, B. N., and Gupta, A. K. (2013). Formability analysis of austenitic stainless steel-304 under warm conditions. *AIP Conference Proceedings,* 1567(1), 378-381.

57. Bong, H. J., Barlat, F., and Lee, M. G. (2011). Determination of the forming limit diagram of an ultra-thin ferritic stainless steel sheet. *AIP Conference Proceedings*, 1383(1), 815-820.

58. Chen, C. H., Lee, R. S., and Gau, J. T. (2010). Size effect and forming-limit strain prediction for microscale sheet metal forming of stainless steel 304. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 45(4), 283-299.

59. Huang, A., Wang, K., Zhao, Y., Wang, W., Wei, X., and Peng, J. (2023). Effect of Copper Addition on the Formability of 304L Austenitic Stainless Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(8), 3563-3570.

60. Hussaini, S. M., Singh, S. K., and Gupta, A. K. (2014). Experimental and numerical investigation of formability for austenitic stainless steel 316 at elevated temperatures. *Journal of Materials Research and Technology*, 3(1), 17-24.

61. Talyan, V., Wagoner, R. H., and Lee, J. K. (1998). Formability of stainless steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 29(7), 2161-2172.

62. Trzepiecinski, T., and Lemu, H. G. (2017). Effect of computational parameters on springback prediction by numerical simulation. *Metals*, 7(9), 380.

63. Karaağaç, İ. (2017). The experimental investigation of springback in V-bending using the flexforming process. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42(6), 1853-1864.

64. Karabulut, S., ve Esen, İ. (2023). SCGADUB1180 yüksek mukavemetli sacında proses parametrelerinin geri esneme davranışına etkisinin deneysel olarak incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29(1), 68-75.

65. 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.

66. Gürün, H., Çavuşoğlu, O., Çaydaş, U., Özek, C., ve Çelik, M. (2018). AA2024 alaşımının V-bükme işlemi sonrasında geri esneme davranışlarının incelenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(1), 1-8.

67. Butgül, İ., Basmacı, G., ve Sayın, L. (2023). S355JR (ST52) Sac malzemenin bükülmesinde geri yaylanma davranışının incelenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 39(3), 430-437.

68. Karaağaç, İ., Kabakçı, M. O., and Demirel, M. Y. (2021). Experimental investigation of the effects of annealing in Al7075-T6 sheet metal material on formability and springback. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(2), 1319-1329.

69. Olsén, J., Shen, Z., Liu, L., Koptyug, A., and Rännar, L. E. (2018). Micro-and macro-structural heterogeneities in 316L stainless steel prepared by electron-beam melting. *Materials Characterization*, 141(4), 1-7.

70. Zhong, Y., Rännar, L. E., Liu, L., Koptyug, A., Wikman, S., Olsen, J., and Shen, Z. (2017). Additive manufacturing of 316L stainless steel by electron beam melting for nuclear fusion applications. *Journal of Nuclear Materials*, 486(11), 234-245.

71. Emmelmann, C. (2024). *Light Engineering für die Praxis.* Berlin: Springer, 93-115.

72. İnternet: In. EOS Stainless Steel 17-4PH Materials Data Sheet, 2009 EOS GmbH. URL: www.eos.info, Son Erişim Tarihi: 29.12.2024.

73. ASTM A564/A564M “Standard Specification for Hot-Rolled and Cold-Finished Age-Hardening Stainless Steel Bars and Shapes”, West Conshohocken, PA, USA.

74. Lin, X., Cao, Y., Wu, X., Yang, H., Chen, J., and Huang, W. (2012). Microstructure and mechanical properties of laser forming repaired 17-4PH stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 553(5), 80-88.

75. Wu, J. H., and Lin, C. K. (2002). Tensile and fatigue properties of 17-4 PH stainless steel at high temperatures. *Metallurgical and materials transactions A,* 33(17), 1715-1724.

76. Çavuşoğlu, O., Toros, S., and Gürün, H. (2018). The effects of temperature and strain rate on yielding and springback behaviour of DP1000 dual phase steel. *Materials Research Express*, 6(2), 026509.

77. Aydın, K., Karaağaç, İ., and Uluer, O. (2019). The formability and springback characterization of laser-welded DP–HSLA sheets. *Applied Physics A*, 125(7), 1-10.

78. Kalpakjian, S., and Schmid, S. R. (2014). *Manufacturing engineering and technology.* 7th ed. Singapore: Pearson Publications, 568-571.

79. Aydin, K., and Karaağaç, İ. (2019). The experimental investigation of formability and springback in laser welded DP600 sheets. *Materials Research Express*, 6(12), 1265a8.

80. İnternet: AK Steel 17-4 PH Stainless Steel Data Sheet, (2007) AK Steel Corporation. URL: www.aksteel.com, Son Erişim Tarihi: 29.12.2024.

81. ASTM E9, “Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature”, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

82. ASTM E8, “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

83. ASTM E407, “Standard Practice for Microetching Metals and Alloys” ASTM International. West Conshohocken, PA, USA.



Gazili olmak ayrıcalıktır