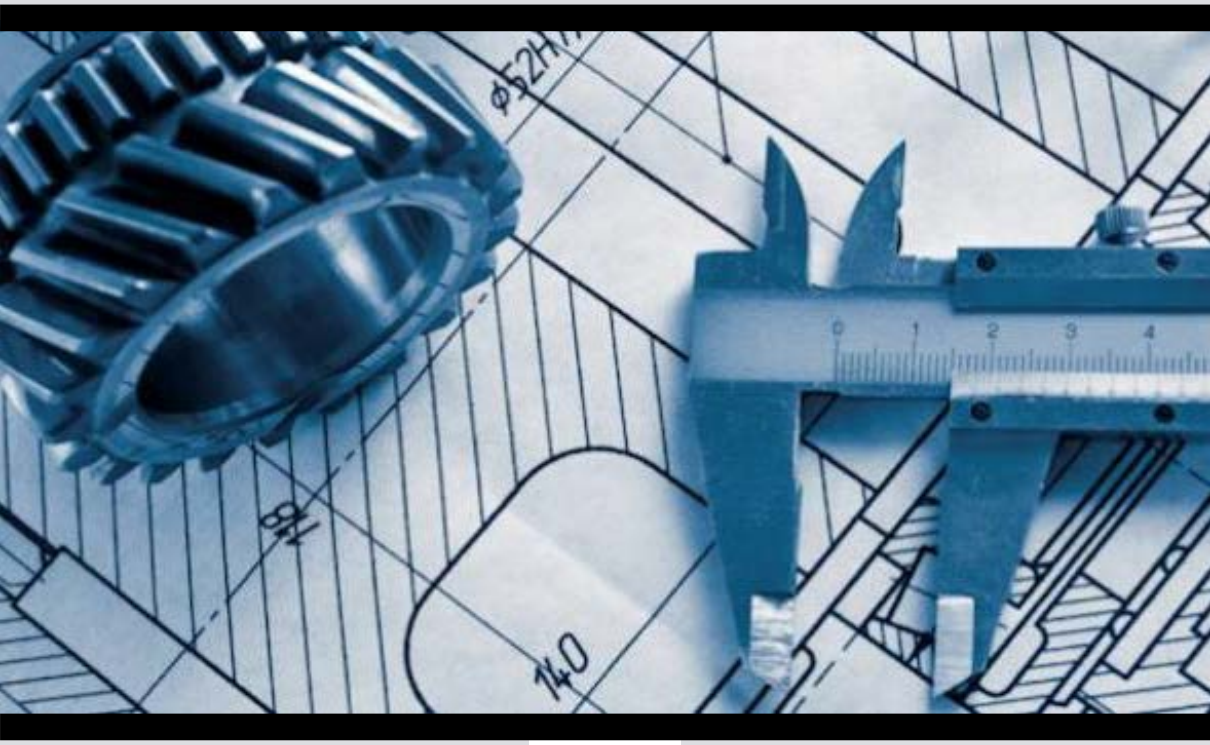
TEORİ VE UYGULAMADA MÜHENDİSLİK ALANINDA YAŞANAN GELİŞMELER

Editör: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet TEMİZ



yaz
yayınları

TEORİ VE UYGULAMADA MÜHENDİSLİK ALANINDA YAŞANAN GELİŞMELER

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet TEMİZ

yaz yayınları

2023

yaz
yayınları

TEORİ VE UYGULAMADA MÜHENDİSLİK ALANINDA YAŞANAN GELİŞMELER

Editor: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet TEMİZ

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-6524-80-4

Aralık 2023 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

info@yazyayinlari.com

SLM İLE ÜRETİLEN IN625 ALAŞIMI İÇİN ISIL İŞLEMİN MEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNE ETKİSİ

Rıdvan YAMANOĞLU[1]

Mertcan KIRAÇ[2]

İdris GÖKALP[3]

1. GİRİŞ

Nikel esaslı süper alaşımlar mükemmel korozyon direnci ve yüksek mekanik özellikler göstermektedirler. Bundan dolayı nikel esaslı süper alaşımlar zorlu çalışma koşullarında paslanmaz çelik ve titanyum esaslı malzemelere göre tercih sebebi olmaktadır [1,2]. Yüksek sıcaklıklarda üstün özellikler sergilemeleri nikel esaslı süper alaşımları vazgeçilmez bir hale getirmiştir. Özellikle uzay, havacılık, otomotiv ve petrokimya gibi endüstriyel uygulamalarda nikel esaslı süper alaşımlar yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan nikel esaslı süper alaşımlara Nimonic, Rene, Udimet, Pyromet, Astroloy, Waspaloy Cabot, Haynes ve Inconel serileri örnek verilebilir [3-5]. IN625 alaşımının kimyasal kompozisyonunda yer alan krom (Cr), molibden (Mo) ve Niyobyum (Nb) gibi alaşım elementleri IN625 alaşımını çalışma performansı bakımından oldukça üstün kılmaktadır [6,7].

[1] Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, ryamanoglu@kocaeli.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-4661-8215

[2] Ermaksan, Bursa, mertcan.kirac@ermaksan.com.tr, ORCID ID: 0000-0003-0793-8117.

[3] Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, idris.gokalp@kocaeli.edu.tr, ORCID ID: 0000-0001-5270-696X

Eklemeli imalat teknolojileri (Eİ) modern bir üretim yöntemi olarak elektronik, otomobil, uzay, havacılık ve biyomedikal gibi uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Eİ teknolojileri yüksek yoğunlukta ve karmaşık geometriye sahip parça üretimine imkân tanımaktadır [8]. Geleneksel üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında büyük bir avantaj sağlayan Eİ teknolojileri yüksek enerji yoğunluğu altında katman katman parça üretimi prensibine dayanmaktadır [9]. Eİ teknolojilerinde genellikle hammadde olarak metal tozu kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan Eİ teknolojilerine kıvılcım plazma sinterleme (SPS), elektron ışın ergitme (EBM) seçici lazer ergitme (SLM) yöntemleri örnek olarak verilebilir [10-12]. Bu yöntemler arasında özellikle uzay ve havacılık sektöründe kullanılan malzemelerin üretiminde SLM metodu dikkat çekmektedir. SLM metodu bir tabla üzerine serilen metal tozun ergitilmesi ve ardından hızlı bir şekilde katılaşması ile parça üretiminin gerçekleştiği bir yöntemdir [13]. Diğer Eİ yöntemleri ile karşılaştırıldığında SLM metodu ile daha yüksek yoğunlukta ve mükemmel boyut hassasiyetine sahip yapısal malzemeler üretilebilmektedir. Diğer yandan her ne kadar SLM metodu üstün özelliklere sahip olsa da üretim esnasında füzyon eksikliği ve gaz boşlukları gibi birçok kusur ile karşılaşılmaktadır. SLM metodu ile yüksek enerji yoğunluğu altında parça üretimi gerçekleştiğinden dolayı proses parametrelerinin kontrolü oldukça zordur [14].

SLM metodunda üretim parametrelerinin optimizasyonu kritik bir öneme sahip olmaktadır. Optimizasyon işleminde lazer gücü (W) ve tarama hızı (mm/s) en önemli parametrelerdir [15]. Bu parametrelerin malzeme cinsine ve uygulama alanına göre belirlenmesi gerekir. Üretim parametrelerinin optimzasyonuna rağmen her üretim yönteminde olduğu gibi SLM metodu ile üretilen parçalarda da içyapıda homojenliğin sağlanması için ısıl işleme ihtiyaç duyulmaktadır. Uygun ısıl işlem parametrelerinin

belirlenmesi ile homojenliğin yanı sıra içyapıda meydana gelen gerilmeler giderilebilmektedir. Ayrıca ısıl işlem mukavemetin artışına katkı sağlamaktadır [16,17].

Bu çalışmada uzay ve havacılık uygulamalarında yüksek mekanik özelliklerinden dolayı tercih edilen IN625 alaşımının SLM metodu ile üretimi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Üretim parametrelerinin optimizasyonu sonrasında IN625 alaşımında gerilmelerin giderilmesi ve mekanik özelliklere etkisinin belirlenmesi için ısıl işlem uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak ısıl işlemin etkisi ortaya konmuştur.

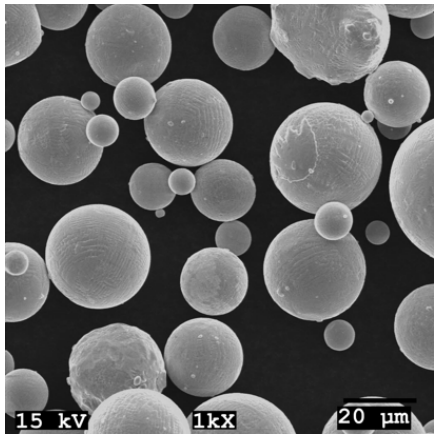
2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada kullanılan IN625 alaşımının kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de verilmiştir. Şekil 1'de ise IN625 alaşım tozunun JEOL JSM-600 model taramalı elektron mikroskobu ile çekilen SEM görüntüleri verilmiştir.

Tablo 1. IN625 Alaşımının Kimyasal Kompozisyonu (% Ağ.)

Element	**Ni**	**Cr**	**Mo**	**Nb**	**Fe**
%	Kalan	21,54	8,91	3,49	1,07

Şekil 1. IN625 Alaşım Tozunun SEM Görüntüsü



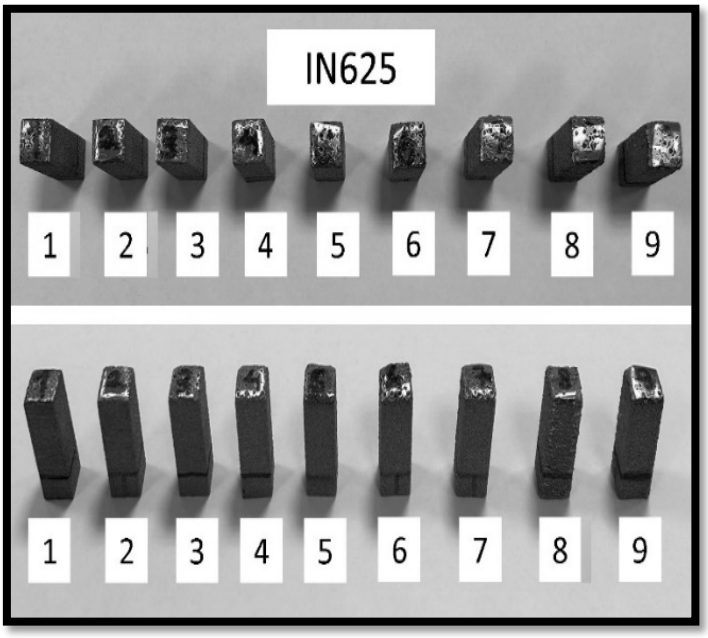
ERMAKSAN firması tarafından geliştirilen Enavision marka 3D yazıcıda SLM metodu ile 10x10x30mm boyutlarında IN625 numuneleri üretilmiştir. Üretilen numunelerin üretim parametreleri Tablo 2'de verilmiştir. Numunelerin üretim sonrası makro görüntüleri Şekil 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. IN625 Numunelerinin Üretim Parametreleri

Numune No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Lazer Gücü (W)	350	350	350	350	350	350	350	350	350
Lazer Tarama Hızı (mm/s)	450	400	350	300	250	200	175	150	125
LED Değeri (J/mm)	0,78	0,88	1,00	1,17	1,40	1,75	2,00	2,33	2,80

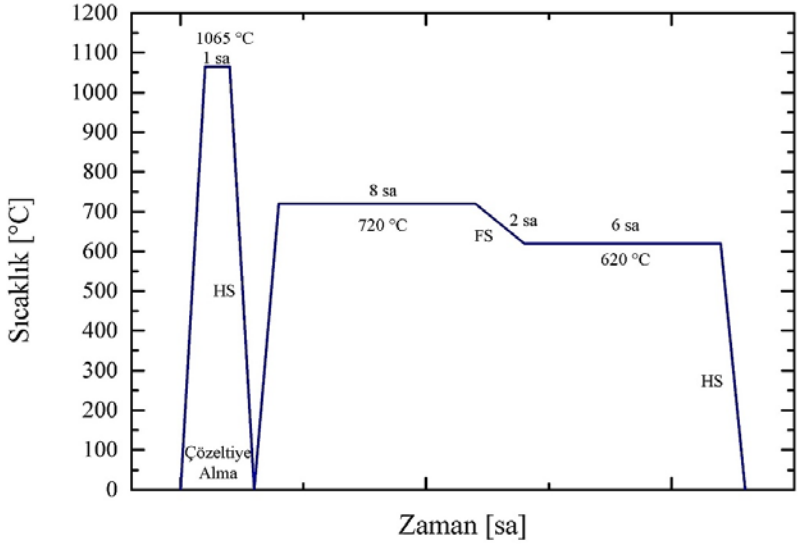
SLM IN625 numunelerin yoğunlukları Arşimet prensibine göre ölçülmüştür. IN625 numunelerde ısıl işlem etkisinin ortaya konması için kullanılan çevrim Şekil 3'te gösterilmiştir. Isıl işlem parametreleri için seçilen sıcaklıklar ve süreler sırasıyla 1065 °C, 720°C, 620°C ve 1sa, 8sa ve 6sa olarak belirlenmiştir. Numuneler ısıl işlem öncesi ve sonrasında metalografik olarak hazırlanmıştır. Sırasıyla 320, 600, 1000 ve 2000 numara SiC zımparalar ile yüzey parlatılmaya hazır hale getirilmiştir. Parlatma işleminde 9µ ve 3µ elmas solüsyonları kullanılmıştır ve yüzey ayna görüntüsü haline getirilmiştir. Mikroyapının ortaya çıkarılması için 15 ml HCl, 10 ml HNO_3 ve 5 ml CH_3COOH çözeltisi ile dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Numunelerin mikroyapısal karakterizasyonu için Olympus BX41M-LED marka ışık mikroskobu kullanılmıştır.

Şekil 2. SLM Metodu ile Üretilen IN625 Numunelerinin Makro Görüntüsü



SLM IN625 numunelerde ısıl işlemin mekanik özellikler üzerine etkisinin belirlenebilmesi için sertlik ve çekme testleri yapılmıştır. Numunelerin sertlik testleri Future-Tech EV-700 Vickers sertlik cihazında gerçekleştirilmiştir. Sertlik testi 10 kgf yük altında ve 10s süre ile yapılmıştır. Son olarak oda sıcaklığında çekme testi uygulanmıştır. Çekme testi Instron 5985 model cihazda gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3. IN625 Numunesi İçin Kullanılan Isıl İşlem Çevrimi



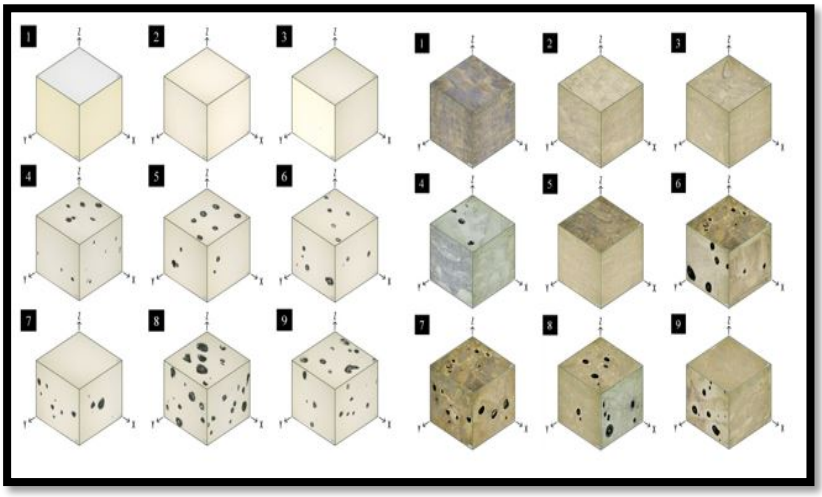
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

SLM metodu ile üretilen IN625 numunelerinin LED değerlerine bağlı yoğunlukları Tablo 3'te verilmiştir. 0,78 J/mm LED değerinde üretilen ve %99,86 g/cm^3 yoğunluk değeri ile en yüksek yoğunluğa sahip 1 nolu numune olmuştur. Diğer yandan 0,88 ve 1 J/mm LED değerlerinde üretilen 2 ve 3 nolu numunelerde sırasıyla %99,8 ve %99,71 g/cm^3 gibi yüksek yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Bir malzemenin yoğunluk değeri doğrudan içyapıyı ve mekanik özellikleri etkilemektedir. [18]. Yoğunluk değerinin mikroyapı üzerindeki etkisinin net bir şekilde anlaşılabilmesi için Şekil 4'te SLM IN625 numunelerinin parlatılmış ve dağlanmış konumdaki optik mikroskop görüntüleri verilmiştir.

Tablo 3. SLM IN625 Numunelerinin Yoğunluk Değerleri

LED (J/mm)	Numune Kodu	Nihai Yoğunluk (g/cm^3)	Relatif Yoğunluk (%)
0,78	1	8,50	99,86
0,88	2	8,49	99,80
1,00	3	8,48	99,71
1,17	4	8,47	99,51
1,40	5	8,46	99,39
1,75	6	8,44	99,22
2,00	7	8,41	98,84
2,33	8	8,35	98,09
2,80	9	8,39	98,57

Şekil 4. IN625 Numunelerinin Parlatılmış ve Dağlanmış Konumdaki Optik Mikroskop Görüntüleri



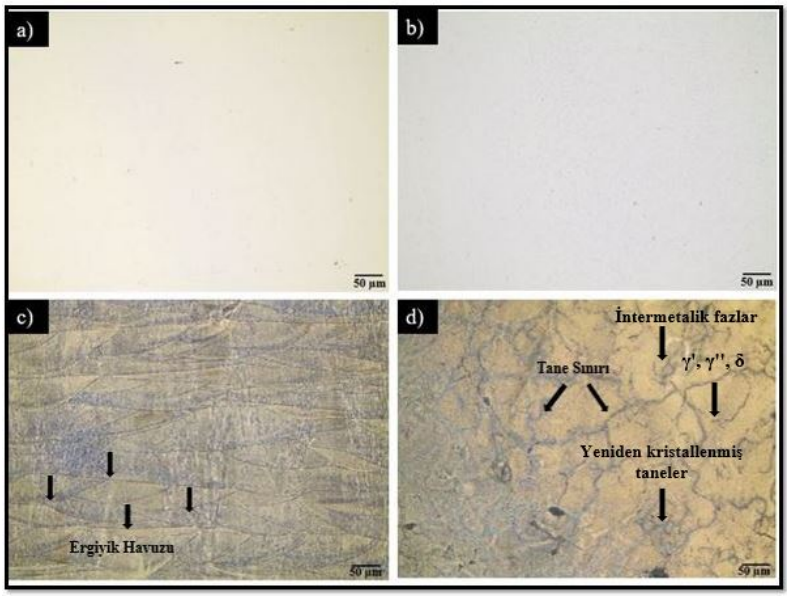
Şekil 4'te IN625 numunelerin optik mikroskop görüntülerinde yüksek yoğunluk değerlerine sahip olan 1, 2 ve 3 nolu numunelerde çok düşük miktarda porozite görülmektedir. Diğer yandan 4, 5, 6, 7, 8 ve 9 nolu numunelerde ise makro boyutta poroziteler mevcuttur. Porozitelerin oluşması üretim esnasında içyapıda biriken çözünmüş gaz birikiminden kaynaklanmaktadır. SLM metodunda üretim parametrelerine bağlı olarak karşılaşılan malzeme kusurları füzyon eksikliği veya

anahtar deliği gözenekliliğidir. Yüksek LED değerlerinde anahtar deliği gözenekliliği görülmektedir. Düşük LED değerlerinde ise füzyon eksikliği kusuruna rastlanılmaktadır [19,20]. Şekil 4'te verilen mikroyapı görüntülerinde yüksek LED (>1 J/mm) değerlerinde meydana gelen anahtar deliği gözenekliliği dikkat çekmektedir.

Bütün üretim yöntemlerinde olduğu gibi Eİ yöntemlerinde de üretim esnasında içyapı kusurları meydana gelmektedir. Özellikle içyapıda meydana gelen porozite ve iç gerilmeler malzemelerin mekanik davranışlarını olumsuz etkilemektedir. Bu kusurların azaltılması veya ortadan kaldırılması için en çok tercih edilen yöntemlerden biri ısıl işlem yöntemidir. Isıl işlem ile birlikte tavlama sıcaklıklarında iç gerilmeler giderilebilmektedir. Diğer yandan intermetalik fazların çökelmesi ile birlikte mekanik özelliklerin iyileştirilmesi sağlanabilmektedir [21.22]. Bu çalışmada da ısıl işlemin mikroyapıya etkisi Şekil 5'te ısıl işlem öncesi ve sonrası parlatılmış ve dağlanmış konumdaki görüntülerde verilmiştir.

Şekil 5a ve b, IN625 alaşımının sırasıyla ısıl işlem öncesi ve sonrası parlatılmış konumdaki optik görüntüleri temsil etmektedir. Şekil 5c ve d ise IN625 alaşımının ısıl işlem öncesi ve sonrası dağlanmış konumdaki görüntüleri ifade etmektedir.. Şekil 5c'de IN625 numunesinin ısıl işlem görmemiş mikroyapısında yoğun bir şekilde ergiyik havuzlara (melt pool) rastlanmıştır. Ergiyik havuzlar SLM metodunun doğası gereği katman katman parça üretimine dayanmaktadır. Her bir ergiyik havuzu sınırı bir katmanı ifade etmektedir. Diğer yandan Şekil 5d'de IN625 alaşımının ısıl işlem sonrasında ergiyik havuzlarının ortadan kalktığı ve yeniden kristalleşme sayesinde hücresel bir yapının oluştuğu görülmektedir [23].

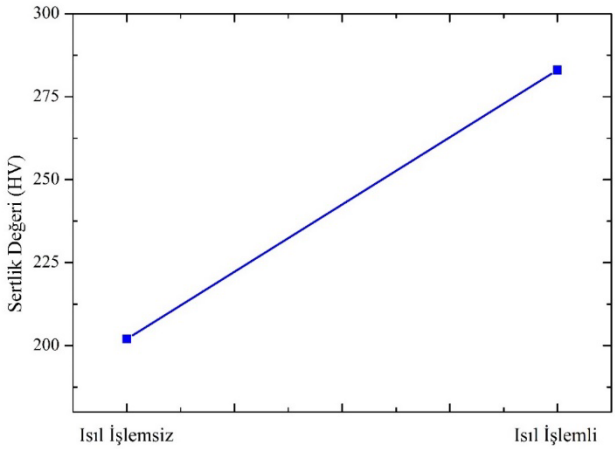
Şekil 5. IN625 Numunelerinin a, c) Isıl İşlem Öncesi ve b, d) Isıl İşlem Sonrası Parlatılmış ve Dağlamış Konumdaki Optik Mikroskop Görüntüleri



Isıl işlem ile birlikte tane sınırlarında gama ve delta (γ', γ'', δ) intermetalik fazları çökelmiştir. Bu intermetalik fazlar tane sınırlarında çökeldikleri için tane büyümesinin önüne geçerek ince taneli bir mikroyapının oluşmasında etkin rol oynamışlardır. İntermetalik fazların çökelmesi ince taneli bir mikroyapının oluşmasının yanı sıra mekanik özelliklerin de gelişmesine doğrudan etki etmektedir. Lİ ve ark. sırasıyla 870°C, 980°C ve 1150°C sıcaklıklarda ısıl işlemin SLM IN625 alaşımına etkisini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde farklı parametrelerde uygulanan ısıl işlem ile birlikte ergiyik havuzların ortadan kalktığı ve yerine ince taneli bir yapının oluştuğu görülmüştür. İnce taneli yapının oluşumu tane sınırlarında çökelen intermetalik fazlardan kaynaklandığı belirtilmiştir [24]. Diğer bir SLM IN625 çalışmasında Ferraresi ve ark. tarafından yaşlandırma ısıl işleminin SLM IN625 alaşımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Isıl işlem öncesi ve sonrası mikroyapı sonuçları

karşılaştırıldığında ısıl işlem etkisi ile dentritik yapı yerine yeniden kristalleşme ile ince taneli bir mikroyapının oluştuğu görülmüştür. Bu sayede ısıl işlem etkisi ile ince taneli bir içyapı elde edilirken diğer yandan mekanik özelliklerin arttığı sonucu elde edilmiştir [25]. IN625 alaşımında ısıl işlemin sertlik değerleri üzerine etkisi Şekil 6'da verilmiştir. Isıl işlem sonrasında dentritik yapı ince taneli bir yapıya dönüşmüştür. Diğer yandan tane sınırlarında γ' ve δ gibi intermetalik fazların çökelmesi ile tanelerin büyümesi engellenmiştir. Bundan dolayı sertlik değerlerinde yaklaşık %40 oranında bir artış görülmüştür.

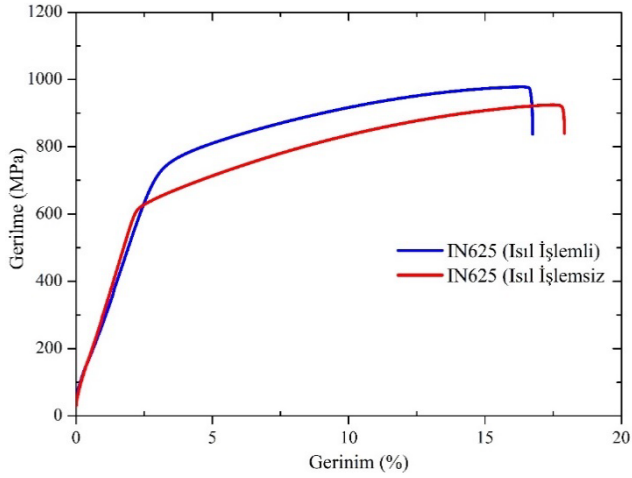
Şekil 6. IN625 Numunelerinin Sertlik Değerleri



Marchese ve ark. tarafından ısıl işlemin IN625 alaşımının mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Isıl işlem sonrası sertlik değerinin arttığı tespit edilmiştir. Isıl işlem ile yeniden kristalleşmenin meydana gelmesi ve tane sınırlarında intermetalik fazların çökelmesi sertlik değerinin artışında etkili olmuştur [26]. Şekil 7 ısıl işlemin gerilme-gerinim değerleri üzerine etkisini göstermektedir. IN625 alaşımında ısıl işlem sonrasında akma dayanımının arttığı diğer yandan yüzde uzama (%) değerinin azaldığı görülmüştür. Yani ısıl işlem sonrası IN625 alaşımının sünekliği azalmıştır. Isıl işlem ile akma dayanımın artması ince taneli bir içyapıdan kaynaklanmaktadır. Özellikle tane

sınırlarında çökelen γ', γ'' ve δ gibi intermetalik fazlar mukavemet artışına doğrudan etki eden diğer bir etken olmuştur.

Şekil 7. IN625 Numunelerinin Çekme Test Sonuçları



Hu ve ark. IN625 alaşımında çözeltiye alma ısıl işleminin mekanik özelikler üzerine etkisini araştırmışlardır. Çözeltiye alma ısıl işleminde rekristalizasyon sonucu yeni taneler oluşmuştur. Tane sınırının artması ve özelikle tane sınırlarında intermetalik fazların çökelmesi ile dislokasyon yoğunluğunda artış meydana gelmiştir. Bundan dolayı mukavemet değerinde artış görülmüştür [27]. Nguejio ve ark. dövme ve SLM yöntemleri ile ürettikleri IN625 alaşımında ısıl işlemin mekanik özellikler üzerine etkisini incelemişlerdir. Hem dövme hem de SLM IN625 alaşımının ısıl işlem sonrası mekanik özelliklerinin arttığı sonucuna varılmıştır. Diğer yandan SLM ve dövme yöntemleri ile üretilen IN625 alaşımlarının ısıl işlem sonrası mekanik özellikleri kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde SLM metodu ile üretilen alaşımın çok daha yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu görülmüştür [28].

3. SONUÇ

Bu çalışmada SLM metodu ile IN625 alaşımlarının üretimi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Ardından ısıl işlemin etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

- SLM metodu ile üretilen 9 adet IN625 numunelerinden 350 W lazer gücü, 450 mm/s ve 0,78 LED değerine sahip 1 numaralı numunenin en yüksek yoğunlukta olduğu tespit edilmiştir.
- SLM metodu doğası gereği üretim esnasında meydana gelen iç gerilmelerin giderilmesi için 1065 °C, 720 °C ve 620 °C sıcaklıklarda sırasıyla 1sa, 8sa ve 6sa süre ile kademeli ısıl işlem gerçekleştirilmiştir.
- Isıl işlem etkisi ile ergiyik havuzlarının ortadan kaybolduğu ve yerine rekristalizasyon sonucu ince taneli bir yapının oluştuğu görülmüştür. Diğer yandan tane sınırlarında γ', γ'', δ gibi intermetalik fazların çökeldiği tespit edilmiştir.
- Isıl işlem öncesi ve sonrası sertlik değerleri karşılaştırıldığında sırasıyla 202±3,1 HV ve 283±2,4 HV değerleri elde edilmiştir. Isıl işlem sonrasında sertlik değeri yaklaşık olarak %40 oranında artmıştır.
- Isıl işlem öncesi ve sonrası çekme gerilme değerleri kıyaslandığında sırasıyla 922±4 MPa ve 975±2 MPa olarak elde edilmiştir. Isıl işlem ile birlikte gerilme değerlerinin arttığı ancak sünekliğin azaldığı görülmüştür.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir (Proje No: SAYEM 121D015).

KAYNAKÇA

1. Thellaputta, G. R., Chandra, P. S., & Rao, C. S. P. (2017). Machinability of nickel based superalloys: A Review. Materials Today: *Proceedings*, *4*(2), 3712-3721.
2. Yurtkuran, H. (2021). An evaluation on machinability characteristics of titanium and nickel based superalloys used in aerospace ındustry. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları, 2*(2), 10-29.
3. Pollock, T. M., & Tin, S. (2006). Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: Chemistry, microstructure and properties. Journal of propulsion and power, *22*(2), 361-374.
4. Ganji, D. K., & Rajyalakshmi, G. (2020). Influence of alloying compositions on the properties of nickel-based superalloys: A Review. recent advances in mechanical engineering: *Select Proceedings Of NCAME 2019*, 537-555.
5. Patel, S., Debarbadillo, J., & Coryell, S. (2018, May). Superalloy 718: Evolution of the alloy from high to low temperature application. ın proceedings of the 9th ınternational symposium on superalloy 718 & derivatives: energy, aerospace, and ındustrial applications *Cham: Springer International Publishing*, (Pp. 23-49).

6. Agrawal, V., Gajrani, K. K., Mote, R. G., Barshilia, H. C., & Joshi, S. S. (2022). Wear analysis and tool life modeling in micro drilling of Inconel 718 superalloy. *Journal of Tribology*, *144*(10), 101706.

7. Zhang, F., Wang, C., Wu, Y., Zhou, L., & Tian, Q. (2022). Microstructural stability and mechanical properties of gh742 Ni-based wrought superalloy for turbine disk applications. *Materials Science and Engineering: A*, *832*, 142488.

8. Gökalp, İ., Kıraç, M., Avcu, E., & Yamanoğlu, R. Dental uygulamalarda kullanılan CoCr alaşımının tribolojik özeliklerinin incelenmesi. *BİDGE Yayınları,* 117.

9. Kumar, S. A., & Prasad, R. V. S. (2021). Basic principles of additive manufacturing: different additive manufacturing technologies. In Additive Manufacturing (Pp. 17-35). *Woodhead Publishing.*

10. Yamanoglu, R. (2019). Pressureless spark plasma sintering: a perspective from conventional sintering to accelerated sintering without pressure. Powder *Metallurgy and Metal Ceramics*, *57*, 513-525.

11. Zhang, L. C., Liu, Y., Li, S., & Hao, Y. (2018). Additive manufacturing of titanium alloys by electron beam melting: A Review. *Advanced Engineering Materials*, *20*(5), 1700842.

12. Spears, T. G., & Gold, S. A. (2016). In-Process sensing in selective laser melting (slm) additive manufacturing. Integrating *Materials and Manufacturing Innovation*, *5*(1), 16-40.

13. Gisario, A., Kazarian, M., Martina, F., & Mehrpouya, M. (2019). Metal additive manufacturing in the commercial

aviation industry: *A Review. Journal of Manufacturing Systems*, *53*, 124-149.

14. Bruna-Rosso, C., Demir, A. G., & Previtali, B. (2018). Selective laser melting finite element modeling: Validation with high-speed imaging and lack of fusion defects prediction. Materials & *Design*, *156*, 143-153.
15. Wang, W., Wang, S., Zhang, X., Chen, F., Xu, Y., & Tian, Y. (2021). Process parameter optimization for selective laser melting of Inconel 718 superalloy and the effects of subsequent heat treatment on the microstructural evolution and mechanical properties. *Journal of Manufacturing Processes*, *64*, 530-543.
16. Fayed, E. M., Saadati, M., Shahriari, D., Brailovski, V., Jahazi, M., & Medraj, M. (2021). Optimization of the post-process heat treatment of Inconel 718 superalloy fabricated by laser powder bed fusion process. *Metals*, *11*(1), 144.
17. Mahmood, M. A., Chioibasu, D., Ur Rehman, A., Mihai, S., & Popescu, A. C. (2022). Post-Processing techniques to enhance the quality of metallic parts produced by additive manufacturing. *Metals*, *12*(1), 77.
18. Bekoz, N., & Oktay, E. (2013). Mechanical properties of low alloy steel foams: dependency on porosity and pore size. *Materials Science and Engineering: A*, *576*, 82-90.
19. Adjamskyi, S. V., Kononenko, G. A., & Podolskyi, R. V. (2020). Influence of technological parameters of SLM-Process on porosity of metal products. *The Paton Welding J*, *10*, 13-18.
20. Liu, B., Fang, G., Lei, L., & Yan, X. (2022). Predicting the porosity defects in selective laser melting (SLM) by

molten pool geometry. *International Journal of Mechanical Sciences*, *228*, 107478.

21. Abouelnour, Y., & Gupta, N. (2022). In-Situ monitoring of sub-surface and ınternal defects in additive manufacturing: A review. *Materials & Design*, 111063.
22. Laleh, M., Sadeghi, E., Revilla, R. I., Chao, Q., Haghdadi, N., Hughes, A. E., & Tan, M. Y. (2023). Heat treatment for metal additive manufacturing. *Progress in Materials Science*, *133*, 101051.
23. Schneider, J., Lund, B., & Fullen, M. (2018). Effect of heat treatment variations on the mechanical properties of Inconel 718 selective laser melted specimens. *Additive Manufacturing*, *21*, 248-254.
24. Li, C., White, R., Fang, X. Y., Weaver, M., & Guo, Y. B. (2017). Microstructure evolution characteristics of Inconel 625 alloy from selective laser melting to heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*, *705*, 20-31.
25. Ferraresi, R., Avanzini, A., Cecchel, S., Petrogalli, C., & Cornacchia, G. (2022). Microstructural, mechanical, and tribological evolution under different heat treatment conditions of Inconel 625 alloy fabricated by selective laser melting. *Advanced Engineering Materials*, *24*(4), 2100966.
26. Marchese, G., Lorusso, M., Parizia, S., Bassini, E., Lee, J. W., Calignano, F., & Biamino, S. (2018). Influence of heat treatments on microstructure evolution and mechanical properties of Inconel 625 processed by laser powder bed fusion. *Materials Science and Engineering: A*, *729*, 64-75.

27. Hu, Y. L., Lin, X., Zhang, S. Y., Jiang, Y. M., Lu, X. F., Yang, H. O., & Huang, W. D. (2018). Effect of solution heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy fabricated by laser solid forming. *Journal of Alloys and Compounds*, *767*, 330-344.

28. Nguejio, J., Szmytka, F., Hallais, S., Tanguy, A., Nardone, S., & Martinez, M. G. (2019). Comparison of microstructure features and mechanical properties for additive manufactured and wrought nickel alloys 625. *Materials Science and Engineering*: *A*, *764*, 138214.