




Doğrudan enerji biriktirmesi ve seçimli lazer ergitmesi uygulamalarının Inconel 718 mikroyapısında yol açtığı değişimler

The influence of selective laser melting and directed energy deposition applications on the microstructure of Inconel 718 alloy

Murat Işık^{1,*} 

¹ Bursa Uludağ Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 16120, Bursa, Türkiye

Öz

Nikel-bazlı alaşımlar ve bunlar arasından Inconel 718, zorlu koşullardaki üstün mekanik özellikleri sebebi ile hava-uzay endüstrilerinde sıklıkla tercih edilmektedir. Metal eklemeli imalat teknikleri arasından en popüler olanlar toz yataklı sistemler (seçimli lazer ergitmesi (SLM) ve elektron ışını ergitmesi (EBM)), doğrudan enerji biriktirmesi yöntemleridir. Ancak bu yöntemler ile üretilen Inconel 718 alaşımları üzerinde hala bilinmeyen birçok detay vardır ve üretilen parçaları daha iyi optimize etme ihtiyacı sürmektedir. Mikroyapısal özellikler, mekanik özellikler üzerinde önemli etkiye sahiptir ve DED ve SLM gibi yöntemlerle üretilen mikroyapıları bilmek, aralarında bulunan farkları anlamak endüstri ve akademik topluluğa mikroyapısal optimizasyon açısından katkıda bulunacaktır. Bu motivasyondan yola çıkarak DED ve SLM işleminin Inconel 718 alaşıma mikroyapısal özellikleri inceleme ve farkları ortaya koyma fikri benimsenmiştir. DED ve SLM yöntemleri ile üretilen numuneler optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskopları ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar iki ayrı yöntemle üretilen mikroyapı üzerinde belirgin farklılıklar oluşabildiğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Nikel-bazlı alaşım, Seçimli lazer ergitmesi, Doğrudan enerji biriktirmesi, Isıl işlem

1 Giriş

Eklemeli imalat teknolojileri son zamanlarda akademik camiadan ve endüstriden büyük ilgi görmekte ve gün geçtikçe daha da popüler hale gelmektedir [1, 2]. Biyomedikal, otomotiv ve hava-uzay gibi birçok uygulama alanı mevcuttur [3, 4]. Eklemeli imalat teknikleri seçimli lazer [5] ve elektron ışını ergitmesi [6, 7] gibi toz yataklı sistemlerin yanı sıra, tel-arkı eklemeli imalat [8, 9] ve doğrudan enerji biriktirmesi [10, 11] gibi yöntemleri de kapsamaktadır. Eklemeli imalat yöntemi kafes yapılar ve ince kanalların bulunduğu parçaların üretimi dışında geometrik olarak kompleks parçaların üretilmesi, topoloji optimizasyonu ile dizayn edilen parçaların üretilebilmesi ve işleme zor malzemelerin imalatına da olanak sağlar [5, 12, 13]. Konvansiyonel imalat yöntemlerinde olduğu gibi bir kalıp veya takım ihtiyacını ortadan kaldırır [14]. Ayrıca kullanılan hammadde yönünden de verimliliği yüksek, sarf malzeme israfı düşüktür [15, 16].

Abstract

Inconel 718 have been widely preferred in aerospace industry due to their outstanding mechanical properties under extreme conditions. Powder bed fusion-based systems, such as selective laser melting (SLM) and electron beam melting (EBM), and directed energy deposition (DED) methods are one of the most popular metal additive manufacturing manners. There are still many unknown on additive manufacturing of Inconel 718 alloy and is requirement to further optimize the production of these alloys. Microstructural traits have significant impact on mechanical properties; therefore, better understanding, the microstructure of DED and SLM processed Inconel 718 would contribute the optimization of additive manufacturing of Inconel 718 alloy. The idea of demonstrating microstructural differences and investigation of microstructures formed using DED and SLM has been adopted. DED and SLM samples are investigated using optical microscope and scanning electron microscope. The results show DED and SLM manners promotes major differences in microstructure of Inconel 718 alloy.

Keywords: Nickel-based alloy, Selective laser melting, Directed energy deposition, Heat treatment

Yukarıda bahsedilen işleme zor malzemelerden bir tanesi de Nikel-bazlı alaşımlardır. Nikel bazlı alaşımlardan özellikle Inconel 718, yüksek sıcaklık gibi zorlu koşullar altında üstün mukavemet, sürünme, ve yorulma gibi mekanik özellikler sergilemelerinden dolayı kritik havacılık parçalarında, örneğin türbin bıçakları ve diskler, ve şaftlarında, sıklıkla tercih edilmektedirler [17–19]. Inconel 718 malzemenin üstün mekanik özellikleri mikroyapısal karakteristikleri ile yakından bağlantılıdır. Inconel 718 alaşımların mikroyapısal bileşenlerinden olan yüzey merkezli kübik γ -Ni₃(Al,Ti) fazı ve hacim merkezli tetragonal yapıdaki γ' -Ni₃Nb fazı Inconel 718 alaşımların mukavemetlenme mekanizmalarını oluşturur [20]. γ ve γ' fazları dislokasyonlar üzerinde doğal bariyerler olarak görev yaparak dislokasyon hareketlerine mani olurlar ve bu sayede Inconel 718 malzemenin yüksek sıcaklıklarda üstün mekanik özelliklere sahip olmasını sağlarlar. Önlerine engel çıkan dislokasyonlar çökelti fazlarını keserek veya çevrelerinden geçmek durumunda kalarak hareket ederler.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: muratisik@uludag.edu.tr (M. Işık)

Geliş / Received: 08.07.2022 Kabul / Accepted: 05.10.2022 Yayınlanma / Published: 15.01.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1142507

Bunlara ek olarak Inconel 718 mikroyapısı tane sınırlarında mikroçatlaklara yol açan ortorombik kırılğan δ fazı da mevcuttur [21]. Yine diğer bir kırılğan faz olarak hegzagonal yapıda bulunan Niyobyum zengini ve metaller arası bileşik olan laves fazı sıralanabilir [22]. Laves fazı Niyobyum ayrışması ile meydana gelirken ana mukavemetlenme fazlarını zayıflatır ve matristeki Molibden, Titanyum ve Nikel gibi elementleri tüketir. Literatürden bilinen bu verilere dayanarak mikroyapının alaşımın mekanik özellikleri üzerinde ve dolayısı ile endüstriyel uygulamalar üzerine etkisi olacağı açık bir durumdur. Inconel 718 de dahil, eklemeli imalat ile üretilen birçok malzeme üretim işlemi için üretim parametreleri benzeri değişkenlere hassastır [23, 24]. Dolayısı ile buna kullanılan eklemeli imalat yöntemi de dahil edilebilir. Mikroyapı ve dolayısı ile de mekanik özellikler üzerinde değişikliklere yol açan bir diğer uygulama ise ısıtma işlemleridir [25]. Bilgimiz kadarı ile, daha önce literatürde farklı eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmiş Inconel 718 alaşımın mikroyapısını anlamaya yönelik bir deneysel çalışma ilk elden gerçekleştirilmemiştir. Daha önce farklı metal eklemeli imalat yöntemi kullanılarak üretilen alaşımların kıyaslamalarında sadece/kısmen literature bağlı kalınırken ve (tek bir cihaz ile üretimi içeren) çalışmalar yoğunlukta iken, mevcut çalışmada farklı iki metal eklemeli imalat ile üretilen mikroyapılar deneysel olarak üretilerek kıyaslanmıştır. Eklemeli imalat ile üretilen malzemelerin daha iyi anlaşılması ve birbiri ile kıyaslanarak bir tartışmanın yapılabilmesi eklemeli imalatın daha kullanılabilir hale gelmesi, eksikliklerinin giderilmesi ve ilerleyen yıllarla beraber geleneksel imalat yöntemlerine sağlam bir alternatif olabilmesi açısından elzemdir; akademik ve endüstriyel topluluklar halen eklemeli imalatın, üretim hızı, porozite, hasar ve yorulma ömrüne doğrudan etkisi bulunabilen yüzey morfolojisi ve pürüzlülüğü gibi konularda eksikliklere sahip olduğu ve daha ileri seviyede geliştirilmesi hususunda mutabıktır [9, 26, 27]. Mevcut çalışma da iki farklı eklemeli imalat yöntemi olan DED ve SLM yöntemleri ile üretilen Inconel 718 malzemelerin özellikle mikroyapılarının ve bir miktar da yüzey morfolojisinin nasıl etkileyebildiğini açıklanarak yukarı bahsedilen amaçlara katkıda bulunabilmeyi dolayısı ile akademik ve endüstriyel topluluğa katkıda bulunmak hedeflemiştir.

DED ve SLM tekniklerinin en çok tercih edilen üretim stratejilerinden ikisi olduğu bilgisini değerlendirerek, Inconel 718 alaşımı bu iki teknik kullanarak üretilmiştir. İki ayrı üretim yönteminin mikroyapıda açtığı değişimleri incelemek, anlamak ve açıklamak amacı ile üretilen parçalar optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) gibi yöntemler ile incelenmiştir. İlave olarak ısıtma işleminin etkisi, SLM ile üretilen parça üzerinde incelenmiştir. Dahası üretilen parçaların yüzey pürüzlülükleri de profilometre aracılığı ile incelenmiştir.

2 Materyal ve metot

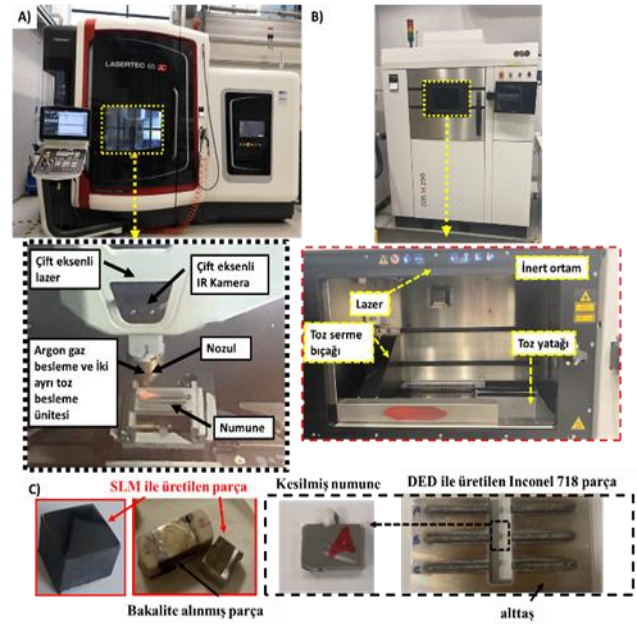
2.1 Numunelerin farklı eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmesi

Toz boyutu 45-106 μm arasında olan Nikel-bazlı alaşım Inconel 718 tozu (Oerlikon, Freienbach, İsviçre) sürekli

dalga Nd-YAG lazer sistemli doğrudan enerji biriktirmesi kullanılarak 316 L paslanmaz çelik tabla üzerinde üretilmiştir (DMG Mori Seiki LASERTEC 65 DED hibrit cihaz). DED sistemi Şekil 1a'da gösterilmiştir. DED Inconel 718 malzemesi 2000 W lazer gücü, 22.2 m/s tarama hızı kullanılarak üretilmiştir. İki farklı ebatta numune üretilmiştir. Biri ergi havuzunu kolayca gözlemlemek amaçlı $\approx 2.5\text{mm} \times 0.7\text{mm}$, diğeri 3.1mm x 3.6 mm şeklindedir. Toz boyutu 15-45 μm arasında değişen Inconel 718 tozlarının (EOS, Almanya) bir kısmı seçimli lazer eritmesi (SLM, (EOS M290, EOSINT GmbH-Elektro-Optik cihazı)) yöntemi kullanılarak paslanmaz çelik tabla üzerine standart parametre kullanılarak işlenmiştir. Üretimde kullanılan SLM sistemi Şekil 1b'de verilmiştir. Inconel 718 tozu 285 W lazer gücü ve 960 m/s tarama hızı ve X, Y, değişen ve dönen tarama stratejisi kullanılarak üretilmiştir. Numune ebatları 10 mm x 10 mm şeklindedir. Deney için seçilen SLM ve DED lazer gücü değerleri endüstriyel uygulamalar için gerçekleştirilen değerler ve standartlar kullanılarak karar verilmiştir. DED ve SLM işlemlerinde kullanılan Inconel 718 tozunun bileşimi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Inconel 718 DED ve SLM tozunun kimyasal bileşenleri ve ağırlık yüzdeleri

	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Al	Ti
Inconel 718	53.9	18	18	5	3	0.6	1



Şekil 1. Bu çalışmadaki numunelerin üretiminde kullanılan (a) DMG MORI Lasertec 65 3D doğrudan enerji biriktirmesi ve (b) EOS M290 seçimli lazer eritmesi cihazları (c) SLM ve DED ile üretilen numuneler

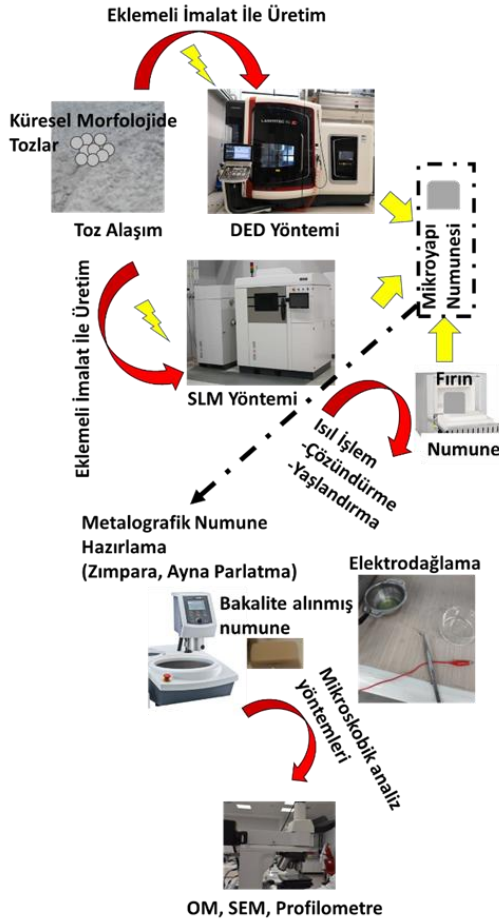
2.1.1 Isıl işlem uygulanması

SLM Inconel 718 ve DED Inconel 718 alaşımın bir diğer kısmı daha sonra iki basamaklı bir ısıtma işleme tabi tutulmuştur. İlk basamakta 1066 $^{\circ}\text{C}$ 'de 1 saat süre ile çözüldürme işlemi uygulanmıştır. İkinci basamakta ise iki

kısımdan oluşan yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Birinci yaşlandırma işleminde 760 °C'de 10 saatlik yaşlandırma işlemi uygulanırken daha sonra 649 °C'ye saatte 55 °C hızla düşülmüş ikinci kısımda ise 649 °C ve 8 saatlik yaşlanma işlemi uygulanmıştır. Isıl işlemi takiben Inconel 718 numuneler paslanmaz çelik tabladan tel erozyon kesimi aracılığı ile ayrılmıştır.

2.1.2 Mikroyapı ve faz analizi

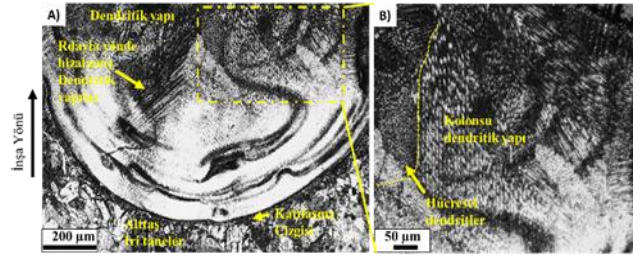
DED ve SLM ile üretilen numuneler, üretim işleminin ardından tel erozyon cihazı ile kesilmeleri gerçekleştirilmiş olup daha sonra soğuk bakalit ile kalıba alınmışlardır. Numunelerin ara kesitleri SiC zımpara kağıdı kullanılarak zımparalanmış daha sonra kumaş üzerinde 0.05 µm Al₂O₃ süspansiyonu kullanılarak ayna seviyede parlatılmıştır. Parlatılan numuneler hazırlanan bir düzenek ve %5'lik HCl asit sulu çözeltisi ve 3V'luk bir potansiyel kullanılarak 10 saniye boyunca elektrolitik olarak dağlanmıştır. DED ve SLM ile üretilen numuneler taramalı elektron mikroskobu (SEM, FE-SEM, Zeiss Leo Supra VP 35) ve optik mikroskop (OM, Nikon Clemex LVN100ND) kullanılarak karakterize edilmiştir. Yüzey morfolojisi analizleri temassız 3B NanoFocus Usurf profilometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 2'de genel olarak üretim ve analiz kısmı şema halinde verilmiştir.



Şekil 2. DED ve SLM numunelerin üretim ve analiz şeması

3 Bulgular ve tartışma

Şekil 3, DED ile işlenmiş Inconel 718 alaşımın yüksek büyültme ve küçük büyültme optik mikroskop resimlerini göstermektedir. Paslanmaz çelik alttaş kısmında geniş taneli mikroyapı göze çarparken DED ile işlenmiş Inconel 718'in olduğu kısımda DED işleminin etkisi ile daha ince mikroyapılı bir malzemenin ortaya çıktığı görülmektedir. Bunun sebebi DED işlemi esnasında gerçekleşen ve 10³-10⁴ K/s arası olan soğuma oranlarıdır [28–30]. Yine DED işleminin bir etkisi olarak, katılaşıma çizgisi yakınlarında ergime ve ardından gerçekleşen hızlı soğumadan kaynaklı kolonumsu bir dendritik yapı oluşumu göze çarpmaktadır; Inconel 718'de benzer bir kolonumsu dendritik yapı daha önce bir kaynak (GTAW) çalışmasında [31] gözlemlendiği bildirilmiştir. Ergime sonrası katılaşıma esnasında katı-sıvı ara yüzeyinde oluşan çıkıntı benzeri yapıların negatif termal eğim ile birlikte sıvı yönüne doğru ince ve ağaç benzeri yapılarda katılaşıp ilerlemesi sonucu ve bu esnada sıvı kısım tarafından da bir miktar enerji absorbe edilerek dendritik yapıları oluşturmaktadır [32]. Dendritik yapının ergi havuzunun radyal yönüne doğru hizalanmış olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 3b'deki yüksek büyültmeli resimden de gözlemlendiği üzere diğer kısımlara göre daha az bir kısmın dağınık olabildiği görülmektedir. Literatürde bazı durumların her zaman düzenli bir dendritik ağ yapısına sahip olamadığı, dendritik ağ yapısının düzensiz olduğu durumlar da mevcuttur [33]. İki kısımda da, düşük ve yüksek büyültmeli Inconel 718 kısımlarında, herhangi göze çarpan bir çökeltiye rastlanmamıştır.

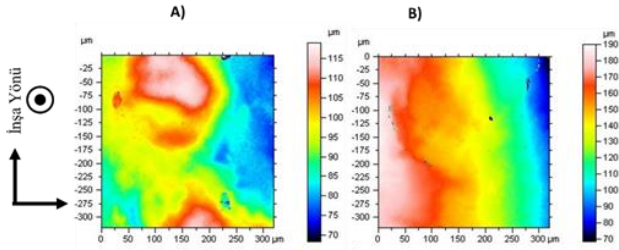


Şekil 3. DED Inconel 718 alaşımının (a) düşük (b) yüksek magnifikasyon mikroskop resimleri

Alttaş kısmından daha fazla uzaklaştıkça dendritik yapının daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Dendritik taneli yapısı olarak farklı bölgelerde gözle görülür bir yapı inceliği farkı göze çarpmamaktadır. DED ile üretilen yapıda kalıntı stres kaynaklı herhangi bir çatlak veya dikkat çekici herhangi bir büyük porozite göze çarpmamaktadır. Herhangi bir baskın gaz porozitesi yapısı da numunede gözlemlenmemiştir [34]. Benzer şekilde alttaş üzerine inşa sonucu herhangi bir delaminasyon da gözlemlenmemektedir ki literatürde daha önce Inconel 718 inşası durumunda delaminasyonun gözlemlendiği durumlar da bulunmaktadır [35]. Delaminasyon durumu da yine benzer şekilde malzeme içerisinde kalıntı gerilimlerin homojen olmayan ısı dağılımı ile çekme gerilimlerini oluşturmaya ve alttaşın ayrılmasına sebep olmaktadır. Alttaşın üretim öncesi bir miktar ısıtılması bu tarz durumları engellemek için

kullanılırken mevcut çalışmada ise buna gerek kalmamıştır. Herhangi bir büzülme boşluğu da gözlenmemektedir.

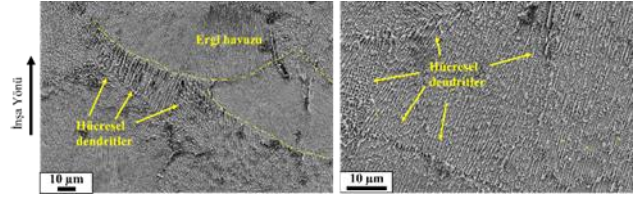
Inconel 718 malzemenin yüzeyinde yapılan profilometre resmi Şekil 4'te verildiği gibidir. DED ile inşa edilen son tabaka olan yüzey kısmında ergimemiş tozlar kaynaklı pürüzlülüğe yol açmaktadır. Yüksek tarama hızı kullanılmasının ergime esnasında ergi havuzunda bulunan tozların ıslanabilirliğini ve yüzey gerilimini etkilediği ve topaklanmaya yol açabildiği bilinmektedir [36]. Topaklanma sorunu da yine yüzey pürüzlülüğü üzerinde negatif etkiye sahiptir. Mevcut çalışmada topaklanma kaynaklı bir pürüzlülük tespit edilememiştir. Yapılan analiz sonucunda DED ile işlenmiş Inconel 718 nunesinin yüzey pürüzlülüğü değeri Ra: 9.9 µm olarak ölçülmüştür. Isıl işlem uygulanmış DED numunesinin Ra değeri ise 5.6 µm olarak tespit edilmiştir. Isıl işlem sonrası yüzey pürüzlülüğü değerinin bir miktar daha düşük olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 4. (a) DED Inconel 718 (b) ısıl işlem uygulanan DED Inconel 718 alaşımın profilometre aracılığı ile gözlemlenen yüzey morfolojisi

SLM ile üretilmiş Inconel 718 numunenin mikroyapısı SEM ile incelenmiş ve Şekil 5'te gözlemlendiği gibi verilmiştir. DED ile üretilmiş numuneye göre daha küçük ergi havuzuna sahip olduğu şekilden gözlemlenebilmektedir; Şekil 6a'da bu fikri destekleyici niteliktedir. SLM işleminde de DED işleme benzer şekilde çok ince mikroyapıda bir durumun ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. SLM işleminde gerçekleşen 10^3 - 10^8 K/s arası soğuma oranlarının [17] çok ince yapıda mikroyapı oluşmasına yol açtığı görülmektedir. SLM mikroyapısının DED mikroyapısına göre daha ince olduğu mikroyapı analizleri sonuçlarında tespit edilmiştir. Bunun sebebinin soğuma oranı farklılıkları olduğu düşünülmektedir; DED için rapor edilen soğuma oranları değerleri SLM prosesine göre daha düşüktür. Ek olarak, daha önce literatürde yapılan bir çalışmada soğuma oranının dendritik yapının büyüklüğü üzerinde etkisi olduğu ortaya konmuştur [37]. Yine DED örneğine benzer şekilde, dendritik yapı ergi havuzunun radyal yönüne doğru hizalanmış durumdadır. Ergi havuzuna yakın olan dendritik yapının bir kısmı Şekil 5'a dan da görülebileceği üzere hücrel karakteristiktir ve numunenin diğer kısımlarından daha geniş yapıda olduğu gözlemlenmektedir. Bu durumun sebebinin eklemeli imalatın doğası gereği üst üste gelen ergi havuzlarının ve ısı uygulanması sonucu önceki katmanda bir miktar genişlemeye neden olması durumundan kaynaklanıyor olması olası ihtimaller arasında bulunmaktadır. Ayrıca DED numunesine nazaran hücrel kısımların SLM numunesinde daha baskın olduğu gözlemlenmektedir. Dendritik yapıdaki kolonumsu ve

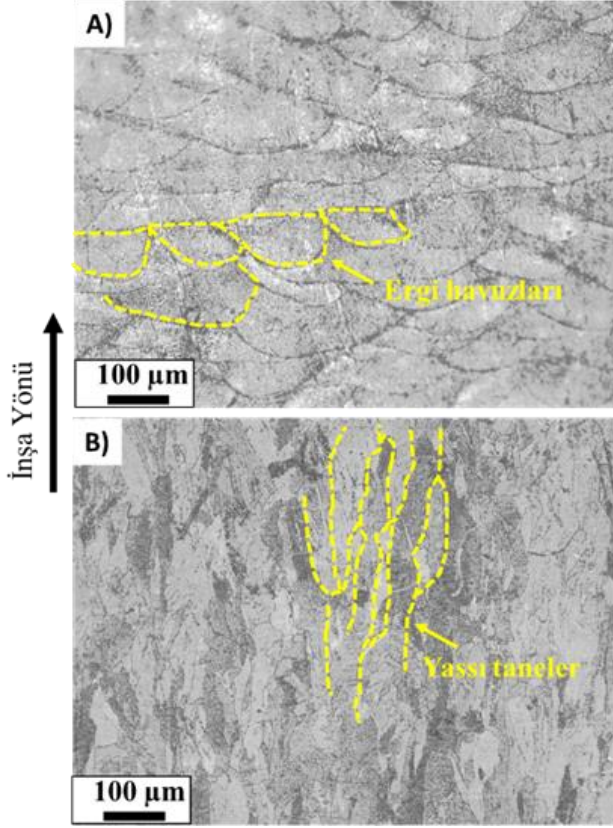
hücrel dendritik yapıların mekanik özellikleri farklı etkileyebileceği daha önce rapor edilmiştir [38]. DED numunesinden farklı olarak resimdeki bazı kısımlarda karbür yapıları benzeri çökeltiler gözlemlenmektedir. Daha önce EBM Inconel 718 üzerinde yapılan çalışmada da MC tip karbür varlığı gözlemlenmiştir [14]. Yapılan mikroyapı analizleri sonucunda SLM ile üretilen numunede, daha önce EBM ve SLM gibi yöntemler kullanılarak gerçekleştirilen bazı çalışmalarda gözlemlendiği gibi bir füzyon eksikliği [12, 39, 40], büzülme, porozite veya herhangi bir çatlak ve çarpılma varlığı tespit edilmemiştir.



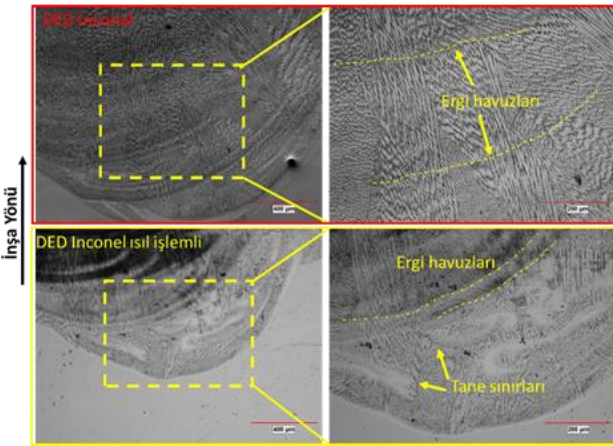
Şekil 5. SLM ile işlenmiş Inconel 718 alaşımın taramalı elektron mikroskobu resimleri

Şekil 6'da SLM ile üretilmiş numunenin ısıl işleme tabi tutulmadan önce ve sonraki durumlarını gösteren optik mikroskop resimleri yer almaktadır. Isıl işlem SLM ile üretilen parçalara kalıntı gerilimlerden kurtarmak ve tabladan kesim esnasında çarpılma durumlarından kaçınma gibi avantajları sağlamanın yanı sıra yaşlandırma ile mukavemetlenmeyi de amaçlamaktadır. Isıl işlem öncesi SLM numunesinde üst üste örtüşmüş durumda olan 100-150 µm arası ergi havuzlarından oluşan ve bu ergi havuzlarının içi, Şekil 5'te gösterildiği gibi oldukça ince taneli dendritlerden olan mikroyapının ısıl işlem sonrası bambaşka bir şekle değişmiştir. Tanealtı hücre yapısında bulunan mikroyapının, ısıl işlem etkisi ile toparlanma evresine girdiği değerlendirilmiştir. Hücrel yapıdaki mikroyapının yeniden kristallenerek dislokasyonsuz/düşük dislokasyonlu tane yapısına geçtiği ve tane sınırlarının yer değiştirmesi ile tane büyümesi durumunun gerçekleştiği fikri, daha önceki literatür bilgileri de değerlendirilerek, düşünülmektedir [25,41-44]. Isıl işlem sonrasında inşa yönüne paralel hizalanmış yassı bir mikroyapı göze çarpmaktadır. Buna ek olarak mikroyapıda bazı eşeksenli tanelerin varlığı da mevcuttur. Isıl işlem sonrası çok ince yapıda olan mikroyapı belirgin halde değişmiş daha iri taneli bir mikroyapıya doğru değişmiştir. SLM ile üretilmiş Inconel 718'in ısıl işlem uygulanması sonucu elde edilen mikroyapı aynı zamanda EBM ile üretilmiş Inconel 718 ile de büyük benzerlik göstermektedir; EBM Inconel 718'in mikroyapısında da inşa yönüne paralel olarak hizalanmış yassı tanelerin varlığı daha önceki literatür çalışmalarında gözlemlenmiştir [14,45].

Şekil 7'de Inconel 718 alaşımın ısıl işlem öncesi ve sonrası mikroskop resimleri yer almaktadır. Ergi havuzları varlığı ısıl işlem sonrası da korunmuştur. SLM işlemi ile üretilen numunede ısıl işlem sonrası ergi havuzları ortadan kalkarken, DED işleminde mikroyapıda halen gözlemlenmektedir. DED Inconel 718 numunesine ısıl işlem uygulanması sonrası bazı yeni oluşan tane sınırlarının ortaya çıktığı gözlemlenmektedir (sarı oklar ile gösterilmiştir.) Kolonsu dendritik yapıda bir miktar azalma gözlemlenmiştir.



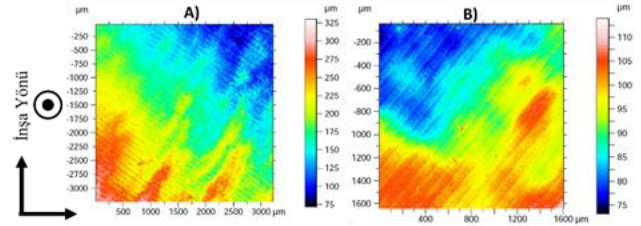
Şekil 6. (a) SLM ile işlenmiş Inconel 718 alaşımın (b) SLM ile üretildikten sonra ısı işleme tabi tutulan numunenin optik mikroskop resimleri



Şekil 7. DED Inconel 718 alaşımı ve ısı işleme tabi tutulan DED Inconel 718 alaşımın mikroyapı resimleri

Şekil 8’de SLM ile işlenmiş numune ve daha sonra ısı işleme tabi tutulmuş numunenin profilometre resimleri verilmiştir. DED ile üretilmiş numunede olduğu gibi ergimemiş kısımlar sonucu oluşan veya küresel yapıda pürüzlülükler oluşmadığı gözlemlenmiştir. SLM ile üretilmiş numune ve ısı işlem görmüş numunelerin Ra yüzey pürüzlülüğü değerleri sırası ile 4.0 µm ve 3.9 µm olarak bulunmuştur. Bu durum SLM ile işlenmiş numunede ısı işlemin yüzey morfolojisinde önemli ölçüde bir değişim gerçekleşmediğini tavsiye etmektedir. Bu yönü ile DED

numunesinden farklılık durumu ortaya çıkmıştır. Literatürde daha önce SLM ile üretilmiş Inconel 718 alaşımlar için 5 µm ile 30 µm civarı bir değer tavsiye etmektedir [40,46]. Bu değerlerin frezeleme veya elektrokimyasal işlemlerle daha da düşük değerlere (1 µm civarı) ulaşılabilirdiği ve yüzeyin daha iyi geliştirilebildiği bilinmektedir [46,47]. Yüksek hızda frezeleme ile bu değerlerin daha da ileri, 0.3 µm’ye kadar geliştirilebildiği rapor edilmiştir [48]. Elde edilen sonuçlar SLM işlemi sonucu elde edilen Ra değerinin DED’ye göre daha az olduğunu işaret etmektedir. SLM ile yüzey kalitesi daha iyi sonuçlar ortaya çıkmaktadır.



Şekil 8. (a) SLM ile işlenmiş Inconel 718 alaşımın (b) SLM ile üretildikten sonra ısı işleme tabi tutulan numunenin yüzey morfolojisi resimleri

4 Sonuçlar

Bu çalışmada DED ve SLM ile üretilen Inconel 718 alaşımlar arasındaki mikroyapısal farklılıklar ele alınmıştır. Deneysel veriler aşağıdaki sonuçları ortaya koymaktadır:

DED üretimi sonucu ortaya çıkan ergi havuzu SLM ile üretime göre daha büyük boyuttadır.

SLM mikroyapısı DED’ye göre daha ince yapıdadır.

DED yapısı daha çok kolonumsu dendritik yapıları içerirken, SLM ile üretilen numune bol miktarda hüresel dendritik yapılar da içermektedir.

SLM numunesine ısı işlem sonucu dendritik yapılar ve ergi havuzu tamamen ortadan kaybolmuş, daha iri bir mikroyapı ortaya çıkmıştır. Bu mikroyapı inşa yönüne paralel yassı taneler ve bir miktar eşeksensli tane içermektedir.

DED numunesine ısı işlem sonrası ergi havuzları varlığını sürdürmüş, yeni tane sınırlarının oluştuğu ve kolonsu dendritlerin kısmen kaybolduğu gözlemlenmiştir.

DED numunesi SLM ile üretilen duruma göre daha yüksek Ra yüzey pürüzlülüğüne sahiptir. ısı işlemlili DED numunesinin Ra değeri, üretim sonrası duruma oranla daha düşük iken, SLM numunesine ısı işlem uygulandığında önemli ölçüde Ra yüzey pürüzlülüğü farkı tespit edilmemiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] F. Careri, D. Umbrello, K. Essa, M.M. Attallah and S. Imbrogno, The effect of the heat treatments on the tool wear of hybrid Additive Manufacturing of IN718, Wear, 203617, 470–471, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203617>.

- [2] Y. Zhang and A. Bandyopadhyay, Direct fabrication of bimetallic Ti6Al4V+Al12Si structures via additive manufacturing, *Additive Manufacturing* 29, 100783, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100783>.
- [3] M. Isik, J.D. Avila and A. Bandyopadhyay, Alumina and tricalcium phosphate added CoCr alloy for load-bearing implants, *Additive Manufacturing*, 36, 101553, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101553>.
- [4] A. Bandyopadhyay, A. Shivaram, M. Isik, J.D. Avila, W.S. Dernell and S. Bose, Additively manufactured calcium phosphate reinforced CoCrMo alloy: Bio-tribological and biocompatibility evaluation for load-bearing implants, *Additive Manufacturing*, 28, 312–324, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.020>.
- [5] T. Maconachie, M. Leary, B. Lozanovski, X. Zhang, M. Qian, O. Faruque and M. Brandt, SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges, *Materials & Design*, 183, 108137, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108137>.
- [6] M. Isik, E. Kisa, B. Koc, M. Yildiz and B. Pehlivanogullari, Topology optimization and manufacturing of engine bracket using electron beam melting, *Journal of Additive Manufacturing Technologies*, 1, 583, 2021. <https://doi.org/10.18416/JAMTECH.2111583>.
- [7] M. Isik, E. Kisa, B. Koc, M. Yildiz, B. Pehlivanogullari, A. Orhangul, O. Poyraz and G. Akbulut, Topology optimization and finite elemental analysis for an inconel 718 engine mounting bracket manufactured via electron beam melting, *AMCTURKEY Uluslararası Eklemler İmalat Konferansı*, 2019. <https://research.sabanciuniv.edu/41130/>.
- [8] H. Nagamatsu, H. Sasahara, Y. Mitsutake and T. Hamamoto, Development of a cooperative system for wire and arc additive manufacturing and machining, *Additive Manufacturing*, 31, 100896, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100896>.
- [9] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, N. Larkin and S. van Duin, Automatic multi-direction slicing algorithms for wire based additive manufacturing, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 37, 139–150, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.09.002>.
- [10] K. Dortkasli, M. Isik and E. Demir, A thermal finite element model with efficient computation of surface heat fluxes for directed-energy deposition process and application to laser metal deposition of IN718, *Journal of Manufacturing Processes*, 79, 369–382, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.04.049>.
- [11] J.D. Avila, M. Isik and A. Bandyopadhyay, Titanium–Silicon on CoCr alloy for load-bearing implants using directed energy deposition-based additive manufacturing, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 12, 51263–51272, 2020. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c15279>.
- [12] A.R. Balachandramurthi, J. Moverare, S. Mahade and R. Pederson, Additive manufacturing of alloy 718 via electron beam melting: Effect of post-treatment on the microstructure and the mechanical properties, *Materials (Basel)*, 12, 2018. <https://doi.org/10.3390/ma12010068>.
- [13] M. Langelaar, An additive manufacturing filter for topology optimization of print-ready designs, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 55, 871–883, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00158-016-1522-2>.
- [14] S.H. Sun, Y. Koizumi, T. Saito, K. Yamanaka, Y.P. Li, Y. Cui and A. Chiba, Electron beam additive manufacturing of Inconel 718 alloy rods: Impact of build direction on microstructure and high-temperature tensile properties, *Additive Manufacturing*, 23, 457–470, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.017>.
- [15] Y. Zhai, H. Galarraga and D.A. Lados, Microstructure evolution, tensile properties, and fatigue damage mechanisms in Ti-6Al-4V alloys fabricated by two additive manufacturing techniques, *Procedia Engineering*, 114, 658–666, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.007>.
- [16] J.K. Watson and K.M.B. Taminger, A decision-support model for selecting additive manufacturing versus subtractive manufacturing based on energy consumption, *Journal of Cleaner Production*, 176, 1316–1322, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.009>.
- [17] H. Yang, G. Jing, P. Gao, Z. Wang and X. Li, Journal of Materials Science & Technology Effects of circular beam oscillation technique on formability and solidification behaviour of selective laser melted Inconel 718: From single tracks to cuboid samples, *Journal of Materials Science & Technology*, 51, 137–150, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.09.044>.
- [18] R.B. Li, M. Yao, W.C. Liu and X.C. He, Isolation and determination for δ , γ' and γ'' phases in Inconel 718 alloy, *Scripta Materialia*, 46, 635–638, 2002. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(02\)00041-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00041-6).
- [19] J. Sun and H. Yuan, Cyclic plasticity modeling of nickel-based superalloy Inconel 718 under multi-axial thermo-mechanical fatigue loading conditions, *International Journal of Fatigue*, 119, 89–101, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.09.017>.
- [20] G.H. Cao, T.Y. Sun, C.H. Wang, X. Li, M. Liu, Z.X. Zhang, P.F. Hu, A.M. Russell, R. Schneider, D. Gerthsen, Z.J. Zhou, C.P. Li and G.F. Chen, Investigations of γ' , γ'' and δ precipitates in heat-treated Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting, *Materials Characterization*, 136, 398–406, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.01.006>.
- [21] Y. Gao, D. Zhang, M. Cao, R. Chen, Z. Feng, R. Poprawe, J.H. Schleifenbaum and S. Ziegler, Effect of δ phase on high temperature mechanical performances of Inconel 718 fabricated with SLM process, *Materials Science and Engineering: A*, 767, 138327, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138327>.
- [22] M. Godec, S. Malej, D. Feizpour, Donik, M. Balažic, D. Klobčar, L. Pambaguian, M. Conradi and A. Kocijan, Hybrid additive manufacturing of Inconel 718

- for future space applications, *Materials Characterization*, 172, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110842>.
- [23] B. Bax, R. Rajput, R. Kellet and M. Reisacher, Systematic evaluation of process parameter maps for laser cladding and directed energy deposition, *Additive Manufacturing*, 21, 487–494, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.002>.
- [24] N. Raghunath and P.M. Pandey, Improving accuracy through shrinkage modelling by using Taguchi method in selective laser sintering, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47, 985–995, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2006.07.001>.
- [25] M. Isik, M. Niinomi, H. Liu, K. Cho, M. Nakai, Z. Horita, T. Narushima and K. Ueda, Optimization of microstructure and mechanical properties of Co–Cr–Mo alloys by high-pressure torsion and subsequent short annealing, *Materials Transactions*, 57, 1887–1896, 2016. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2016112>.
- [26] E. Atzeni, M. Barletta, F. Calignano, L. Iuliano, G. Rubino and V. Tagliaferri, Abrasive Fluidized Bed (AFB) finishing of AlSi10Mg substrates manufactured by Direct Metal Laser Sintering (DMLS), *Additive Manufacturing*, 10, 15–23, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.01.005>.
- [27] C. Gobert, E.W. Reutzler, J. Petrich, A.R. Nassar and S. Phoha, Application of supervised machine learning for defect detection during metallic powder bed fusion additive manufacturing using high resolution imaging., *Additive Manufacturing*, 21, 517–528, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.005>.
- [28] S.J. Wolff, S. Lin, E.J. Faierson, W.K. Liu, G.J. Wagner and J. Cao, A framework to link localized cooling and properties of directed energy deposition (DED)-processed Ti-6Al-4V, *Acta Materialia*, 132, 106–117, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.04.027>.
- [29] B. Zheng, Y. Zhou, J.E. Smugeresky, J.M. Schoenung and E.J. Laverna, Thermal Behavior and Microstructural Evolution during Laser Deposition with Laser-Engineered Net Shaping: Part I. Numerical Calculations, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 39, 2228–2236, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11661-008-9557-7>.
- [30] W.E. Frazier, Metal additive manufacturing: A review, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23, 1917–1928, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>.
- [31] S.G.K. Manikandan, D. Sivakumar and M. Kamaraj, Influence of weld cooling rate, 2019. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818182-9.00004-9>.
- [32] University of Cambridge, Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science. https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/solidification_alloy_s/dendritic.php.
- [33] H. Sahasrabudhe, S. Bose and A. Bandyopadhyay, Laser processed calcium phosphate reinforced CoCrMo for load-bearing applications: Processing and wear induced damage evaluation, *Acta Biomaterialia*, 66, 118–128, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2017.11.022>.
- [34] Y. Huang, D. Wu, D. Zhao, F. Niu and G. Ma, Investigation of melt-growth alumina/aluminum titanate composite ceramics prepared by directed energy deposition, *International Journal of Extreme Manufacturing*, 3, 2021. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/abf71a>.
- [35] M. Miedzinski, *Materials for Additive Manufacturing by Direct Energy Deposition*. Thesis., Chalmers University of Technology, 2017. <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/253822/253822.pdf>.
- [36] C.Y. Yap, C.K. Chua, Z.L. Dong, Z.H. Liu, D.Q. Zhang, L.E. Loh and S.L. Sing, Review of selective laser melting: Materials and applications, *Applied Physics Reviews*, 2, 041101, 2015. <https://doi.org/10.1063/1.4935926>.
- [37] X. Li, J.J. Shi, G.H. Cao, A.M. Russell, Z.J. Zhou, C.P. Li and G.F. Chen, Improved plasticity of Inconel 718 superalloy fabricated by selective laser melting through a novel heat treatment process, *Materials & Design*, 180, 107915, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107915>.
- [38] B. Song, S. Wen, C. Yan, Q. Wei and Y. Shi, Chapter 4-Preparation and processing of metal matrix composites, in: B. Song, S. Wen, C. Yan, Q. Wei, Y.B.T.-S.L.M. for M. and M.M.C. Shi (Eds.), *3D Printing Technology Series*, Academic Press, 89–208, 2021. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-103005-9.00004-3>.
- [39] A.R. Balachandramurthi, J. Moverare, N. Dixit and R. Pederson, Influence of defects and as-built surface roughness on fatigue properties of additively manufactured Alloy 718, *Materials Science and Engineering: A*, 735, 463–474, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.08.072>.
- [40] G.E. Bean, D.B. Witkin, T.D. McLouth, D.N. Patel and R.J. Zaldivar, Effect of laser focus shift on surface quality and density of Inconel 718 parts produced via selective laser melting, *Additive Manufacturing*, 22, 207–215, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.024>.
- [41] A. Rollett, G.S. Rohrer and J. Humphreys, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, 1–704, 2014. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044164-1.X5000-2>.
- [42] J.E. Burke and D. Turnbull, Recrystallization and grain growth, *Progress in Metal Physics*, 3, 220–292, 1952. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0502-8205\(52\)90009-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0502-8205(52)90009-9).
- [43] J.E. Bailey and P.B. Hirsch, The recrystallization process in some polycrystalline metals, *Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences* 267, 11–30, 1962. <https://doi.org/10.1098/rspa.1962.0080>.
- [44] T. Sakai, A. Belyakov, R. Kaibyshev, H. Miura and J.J. Jonas, Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation

- conditions, *Progress in Materials Science*, 60, 130–207, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.09.002>.
- [45] C. Meier, R.W. Penny, Y. Zou, J.S. Gibbs and A.J. Hart, Thermophysical Phenomena in Metal Additive Manufacturing By Selective Laser Melting: Fundamentals, Modeling, Simulation, and Experimentation, *Annual Review of Heat Transfer*, 20, 241–316, 2018. <https://doi.org/10.1615/annualrevheattransfer.2018019042>.
- [46] Z. Baicheng, L. Xiaohua, B. Jiaming, G. Junfeng, W. Pan, S. Chen-nan, N. Muiling, Q. Guojun and W. Jun, Study of selective laser melting (SLM) Inconel 718 part surface improvement by electrochemical polishing, *Materials & Design*. 116, 531–537, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.11.103>.
- [47] A. Shokrani, V. Dhokia and S.T. Newman, Hybrid Cooling and Lubricating Technology for CNC Milling of Inconel 718 Nickel Alloy, *Procedia Manufacturing*, 11, 625–632, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.160>.
- [48] D.M. D’Addona, S.J. Raykar and M.M. Narke, High Speed Machining of Inconel 718: Tool Wear and Surface Roughness Analysis, *Procedia CIRP*, 62, 269–274, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.004>.

