

## AISI 1050 ÇELİĞİ ÜZERİNE INCONEL 718 LAZER DOLGU KAYNAĞININ MORFOLOJİSİ, MİKROYAPISI VE MEKANİK KARAKTERİZASYONU

*Ali ARI\**   
*Taner KARAGÖZ\*\**   
*Orhun ARSLAN\*\*\**   
*Ali BAYRAM\*\*\*\** 

Alınma: 03.01.2023; düzeltme: 07.05.2023; kabul: 08.05.2023

**Öz:** Bu çalışma kapsamında, Inconel 718 tozunun AISI 1050 imalat çeliği üzerine lazerle dolgu kaynağı işlemi uygulandı. Bu işlem sırasında, dispersiyonun mekanik özellikler üzerindeki etkisini analiz etmek için, ilgili parametrelerde üretilen numuneler üzerinde ampirik bir çalışma gerçekleştirildi. Sonuçlar, kopma gerilmesi ve süneklik için yüksek sapmalar olduğunu göstermektedir. Bu dağılım, biriken malzemede gözenekliliğin varlığından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, en iyi sonuçlar merkez bölgedeki numunelerden alınırken, dış bölgelerden alınan numuneler üzerinde yapılan testler kopma gerilmesi ve süneklik için daha düşük değerler göstermiştir. Bunun yanında sertlik değerleri incelendiğinde ısıdan etkilenen bölgenin ana malzemeden daha sert olduğu ve bu da ısıdan etkilenen bölgenin soğuma hızından kaynaklandığı görülmüştür. Buna ilaveten de Laves fazı, zamanla kırılmaya yol açan mikro boşlukların üretilmesinin ana nedeni olduğu anlaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Inconel 718, AISI 1050, lazerle dolgu kaynağı, mekanik özellikler

### Morphology, Microstructure and Mechanical Characterization of Inconel 718 Laser Cladding Application on AISI 1050 Steel

**Abstract:** Within the scope of this study, Laser Cladding of Inconel 718 powder was applied on AISI 1050 fabrication steel. During this process, to analyze the effect of dispersion on mechanical properties, an empirical study was carried out on the samples produced at the relevant parameters. The results show high deviations for breaking stress and ductility. This distribution is due to the presence of porosity in the deposited material. Also, the best results were obtained from the samples in the central region, while the tests performed on the samples from the outer regions showed lower values for breaking stress and ductility. In addition, when the hardness values were examined, it was seen that the heat-affected area was harder than the base material and this was due to the cooling rate of the heat-affected area. In addition, the Laves phase was found to be the main cause of the generation of micro-voids that lead to fracture over time.

**Keywords:** Inconel 718, AISI 1050, laser cladding, mechanical properties

\*OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Silah Sanayi Teknikerliği Bölümü, 06374, Ankara (ali.ari@ostimteknik.edu.tr)

\*\*Coşkunöz Holding Ar-Ge Merkezi, Fethiye OSB Mh. Sari Cd. No: 1, 16140 Bursa, (tkaragoz@coskunoz.com.tr)

\*\*\* Kırpart Otomotiv Parçaları San.ve Tic. A.Ş., 16800, Bursa, (orhunarslan@uludag.edu.tr)

\*\*\*\*Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 16240, Bursa (bayram@uludag.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Lazer kaplama, gelişmiş yüzey özellikleri veya hatalı bileşenlerin onarımı için alt tabaka üzerinde belirli bir kaplama malzemesini eriterek metalurjik bağlanmış bir kaplama üretebilen yüzey modifikasyon teknolojisidir. Lazer kaplama işlemi, kaplama malzemesinin erimesiyle sonuçlanan ve değişen koşullar altında meydana gelen bir lazer toz etkileşimidir. Kaplama işlemi; lazer ışını ayrıldıktan sonra, erimiş toz ve yüzey malzemesi tarafından oluşturulan erimiş havuzun katılaşmasıyla gerçekleşir (Gao et al. 2022).

Toz beslemeli lazer kaplama teknolojisi, lazer ışınları aracılığıyla metal tozlarını bir taban plakası üzerinde eritir ve ardından katman katman biriktirme ve şekillendirme sağlar. Böylece, ısı kaynağı olarak yüksek enerjili lazer ışınları, hammadde olarak ise eşzamanlı beslenen metal tozları kullanılarak hızlı şekillendirme gerçekleştirilir. Bu yöntem, aynı bileşen üzerinde herhangi bir kombinasyon içeren birden fazla malzeme üretmek için kullanılır (Ning et al. 2021).

Thawari ve ark. (2021), yüksek sıcaklığa dayanıklı alaşımlardan Stellite 6 ve Inconel 718'in SS316 üzerindeki çok katmanlı lazer kaplaması, kaplama malzemelerinin kaplama geometrisi, mikro yapı gelişimi ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Her iki alaşım için 20 mm/s'ye kıyasla 12 mm/s ve 16 mm/s tarama hızında kaplama yapılırken kaplama yüksekliğinde %50 ve %30'luk bir artış ölçülmüştür. Inconel 718, Stellite 6'dan %15–25 daha büyük kaplama yüksekliği göstermiştir. Ayrıca, değişen proses parametreleri altında %15–45 penetrasyon derinliği ve Inconel 718'de %10–15 daha yüksek seyreltme elde edilmiştir. Mikrosertlikteki azalma, seyreltme nedeniyle arayüzey yakınında gözlenmektedir ve birinci katmanda ikinci katmana göre daha fazladır. İkinci katmanda elde edilen düşük seyreltme ise altlık üzerine yeni birikmiş katmandan kaynaklanmaktadır. Mevcut çalışma da optimum parametreler (lazer gücü ve tarama hızı) sırasıyla Stellite 6 için 2900 W ve 20 mm/s iken, Inconel 718 için 3400 W ve 12 mm/s olarak saptanmıştır (Thawari et al. 2021).

Lazer kaplama işlemi sırasında, lazer ışını ve malzemeler (alt tabaka ve taşınan toz) arasındaki etkileşim, erime birikimi ile sonuçlanmaktadır. Termal davranış ve katılma özellikleri, kaplama geometrisini ve katılmış mikro yapıyı önemli ölçüde etkilemektedir. Wang ve ark. (2022), Inconel 718'in bir substrat üzerindeki lazer kaplamasında izotermal olmayan akış ve katılma özelliklerini araştırmışlardır. Katılma özelliklerinin (sıcaklık gradyanları (G) ve katılma oranları (R) dâhil) değişimleri analiz edilmiştir. Sonuçlar, katılma özelliklerinde katılma hızının mikro yapıların katılma sürecinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Ayrıca, simüle edilmiş kaplama geometrisi (genişlik ve yükseklik), Inconel 718 malzemesi için karşılık gelen proses parametreleri altında deney sonuçlarıyla iyi bir uyum sağlamaktadır (Wang et al. 2022).

Gopinath ve ark. (2020), Inconel 718 metal matris kompozit kaplamanın SS 304 üzerine lazer kaplamasını gerçekleştirerek, lazer gücü, tarama hızı, toz besleme hızı gibi çeşitli proses parametrelerinin soğuma hızı ve eriyik havuz ömrü üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Lazer gücü 400 W – 1200 W, tarama hızı 200 mm/dk- 1400 mm/dk ve toz besleme hızı 8 g/dk – 20 g/dk olarak belirlenmiştir. Tarama hızının azalması ve lazer gücünün artmasıyla erimiş havuz ömrü uzamış ve soğuma hızı azalmıştır. Bununla birlikte, tarama hızının, lazer gücüne kıyasla erimiş havuz ömrü ve soğuma hızı üzerinde baskın etkiye sahip olduğu görülmüştür (Muvvala et al. 2020).

Alizadeh-Sh ve ark. (2020), Inconel 718 tozunun A-286 Fe bazlı süper alaşım üzerine lazerle kaplanması sırasında katılma çatlamasını tahmin etmek için deneysel-istatistiksel bir yaklaşım araştırmışlardır. Bu yaklaşım, lineer bir regresyon analizine ve temel işleme parametreleri (lazer gücü, P; toz besleme hızı F ve tarama hızı V) ile tek lazer kaplama izlerinin geometrik özellikleri arasındaki deneysel-istatistiksel korelasyonlara dayanmaktadır. Deneysel-istatistiksel analiz, tek lazer kaplama izlerinin yüksekliği ve açısı ile doğrudan ilişkili işleme parametrelerinin sırasıyla  $P^2(F/V)^2$  ve  $P^{0.5}(F/V)^1$  olduğunu göstermiştir. İşlem haritası, %25'ten daha düşük bir substrat seyreltme oranının, katılma çatlamasını önlemek için kritik geometrik özellik olduğunu ortaya koymuştur (Alizadeh-Sh et al. 2020).

Ilanlou ve ark (2022), yaptıkları araştırmada Inconel 738 alt tabakasına uygulanan Inconel 718 kaplamasının geometrik özelliklerinin üzerindeki, üç temel işlem parametresi olan tarama hızı, lazer gücü ve toz besleme hızının etkisini incelemişlerdir. Bu araştırma da Inconel 718 lazer kaplama için en uygun proses parametrelerini elde etmek amaçlanmıştır. Sonuçlar, lazer gücü ve toz besleme hızı sabit tutulurken tarama hızının artırılması, iz yüksekliğinde önemli bir azalmaya yol açtığını göstermektedir. Ayrıca, lazer gücü ve tarama hızı sabitken toz besleme hızındaki artış, iz yüksekliğinin artmasına neden olmaktadır. İz yüksekliğinde en çok tarama hızı etkindir. Ayrıca, artan lazer gücü, artan iz genişliğine yol açar. Ek olarak, tarama hızının azaltılması, lazer ve malzemeler arasındaki etkileşim süresini artırarak iz genişliğinde bir artışa neden olur. İz genişliği, toz besleme hızındaki değişikliklere duyarlı değildir. İz genişliğinde en çok lazer gücü etkindir. Artan toz besleme hızı ve tarama hızının bir sonucu olarak, penetrasyon derinliği azalan bir eğilim göstermektedir. Öte yandan lazer gücünün artırılması, penetrasyon derinliğinde önemli bir artışa neden olur. Penetrasyon derinliği üzerinde en çok lazer gücü etkindir. Tarama hızının artırılması seyreltme yüzdesini artırır. Penetrasyon derinliği ile karşılaştırıldığında, tarama hızının iz yüksekliği üzerinde daha önemli bir olumsuz etkisi vardır. Lazer gücünü artırmak, seyreltme yüzdesini doğrudan artırırken, toz besleme hızındaki bir artış tam tersi sonucu gösterir (Ilanlou et al. 2022).

Jelvani ve ark. (2019), lazer kaplama proses parametrelerinin Inconel 718 alaşımının katılaşması ve nihai mikroyapısı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada, Inconel 718 tozu Inconel 718 substratı üzerine Nd: YAG lazer ile 150-300 W lazer gücü, 4-6 mm/s tarama hızı ve 150, 200, 250, 300 toz besleme hızları kullanılarak kaplanmıştır. Üretilen numunelerde çatlak görülmemesine rağmen kaplama numunesinde az miktarda gözeneklilik gözlemlenmiştir. Sonuçlar, lazer parametreleri ile porozite yüzdesi arasında net bir ilişki olmadığını göstermektedir. Ayrıca toz besleme hızındaki artışla eş eksenli bölge artmaktadır. Kaplamalı katmanın mikro yapısı, sütun şeklinde dendritik ve eş eksenli dendritik yapıdan oluşmaktadır. Kaplamalı katmanın mikro yapısı 150 W ve 200 W lazer güçlerinde sütun şeklinde dendritik yapıda iken 250 ve 300 W lazer güçlerinde eş eksenli dendritik yapıdadır. Yüksek lazer kaplama hızlarında, dendrit ucunun büyüme hızı artmaktadır ve bu durum yapısal aşırı soğumaya neden olmaktadır ve yapı eş eksenli bir dendritik yapıya yönelmektedir. Bu nedenle tarama hızı 4'ten 6 mm/s'ye yükseldikçe eş eksenli dendritik yapı artmaktadır (Jelvani et al. 2019b).

Bu çalışma, AISI 1050 çeliği üzerine, belirlenen parametreler ile lazer kaplama metoduyla Inconel 718 tozlarıyla kaplanmıştır. Bu kapsamda üretilen numunenin morfolojisi, mikroyapısı ve mekanik karakterizasyonu ve aynı zamanda ilgili parametre ile üretilen numuneden, sertlik, çekme ve darbe testleri yapılarak dispersiyonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi analiz edilmiştir.

## 2. METERYAL VE METOT

### 2.1. Materyal

Bu çalışmada altlık malzeme olarak AISI 1050 imalat çeliği (300\*150\*20) mm kullanılmıştır. Dolgu malzemesi, nikel alaşım tozu olan 45-90 µm partikül boyutuna sahip Inconel 718 (IN718) tozu kullanılmıştır. Kullanılan tozun kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1. IN718 tozunun kimyasal bileşimi**

Elementler	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	Al
Ağırlık oranı %	54,19	20,58	15,14	5,13	3,04	0,95	0,67

## 2.2. Metot

Bu çalışma kapsamındaki lazer dolgu kaynağı işlemi, Coşkunöz Holding'e (Bursa TÜRKİYE) ait KUKA KR 90 R3100 ultra (6 Eksenli Endüstriyel robot) kullanılmıştır. KUKA robotunun teknik verileri aşağıda listelenmiştir.

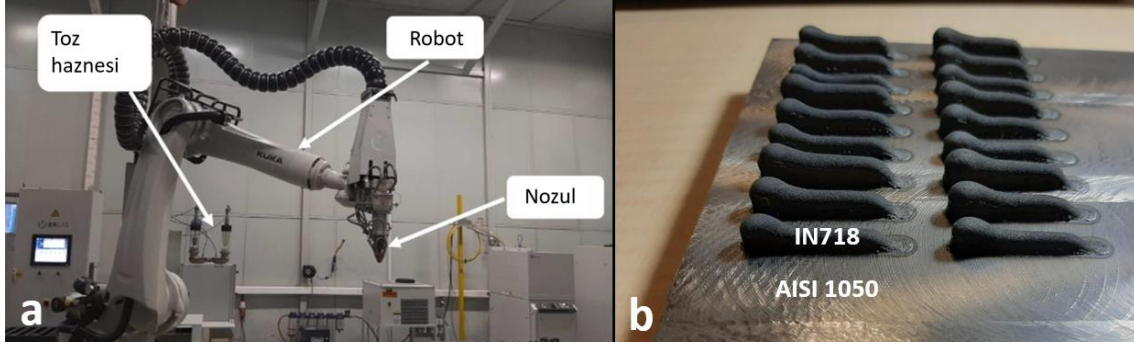
Lazer dolgu kaynağı işlemi için hassas kontrol edilen robotik sistem ve kartezyen koordinatlarda lineer tabloya sahip 6 eksenli dolgu kaynak ünitesi içerisinde yer alan yüksek güçlü diyot lazer (HPDL) kullanılmıştır (Şekil 1). HPDL, maksimum 4 kW çıkış gücü ile 900 ila 1080 nm dalga boyunda 30 mm-rad ışın kalitesine sahip çok modlu bir ışın yayma kapasitesine sahiptir. HPDL ışını, AISI 1050 imalat çeliğine, bir soğutma cihazı ile soğutulan bir toz besleme nozülüne beslenen, 600 µm çapında ve 0,2 sayısal açıklığı olan 30 m uzunluğunda bir fiber aracılığıyla iletilmektedir.

- ✓ Hareket sistemi: KUKA KR 90 R3100 ultra (6 Eksenli Endüstriyel robot)
- ✓ Besleme sistemi: Bağımsız olarak çalıştırılabilen 2 adet toz haznesi
- ✓ Lazer kaynağı: Laserline LDF 4000- 100
- ✓ Maksimum Lazer gücü: 4000W
- ✓ Nokta Büyüklüğü: 3,2 mm
- ✓ Nokta geometrisi: Yuvarlak
- ✓ Lazer kafası: Eş Eksenli Toz Nozulu
- ✓ Toz boyutu: 45- 150 (45-106) mikron

Lazer iç köşe kaynağında birçok parametre kaynağın kalitesini etkiler. Bu parametreler; Kaynak yapılacak ana malzemenin bileşimi, bu malzemenin mekanik özellikleri, dolgu maddesi olarak kullanılacak tozun bileşimi (toz tipi), toz tane boyutu, dolgu kaynağı parametreleri (lazer gücü, avans, toz akış hızı ve buna bağlı olarak kaynak kalınlığı, toz besleme mesafesi, argon gazı debisi), kaynak bölgesine ısı girişi, kaynak bölgesi soğuma hızı, kaynaklar arası mesafe, işlem yönü ve bu parametrelere bağlı olarak katman sayısıdır. İlgili çalışmadaki, Coşkunöz Holding tarafından tercih edilen üretim parametreleri seçilmiştir (Tablo 2).

**Tablo 2. Üretim parametreleri**

Malzeme	IN718
Parçacık boyutu dağılımı (psd)	(-90) - (+44) mikron
Taban plakası boyutu	20mmx300mmx150mm
Parametre numarası	16
Lazer gücü	2100 W
Tarama hızı	10 mm/s
Toz akış hızı (Dev/dak)	5,2
Toz akış hızı (g/dk)	11,024
Gaz akış hızı	8 L/min
Spesifik enerji yoğunluğu (J/mm <sup>2</sup> )	70
Toplam katman sayısı	20 katman
Blok uzunluğu	130 mm
Blok genişliği	60 mm
Her katmandaki iz sayısı	40
Örtülü kafa dikey adım	1 mm
Örtülü kafa yatay adım	1,5 mm
Taban plakası malzemesi	1050 Karbon çeliği



**Şekil 1:**

a) Çalışmada kullanılan KUKA KR 90 R3100 fotoğrafı, b) IN718 Tek parça duvarlar

### 2.3. Deney numuneleri

Çalışma kapsamında mikro yapı ve elementel analiz çalışması yanı sıra çekme, darbe ve sertlik testleri yapılmıştır.

Çekme ve darbe test numuneleri Tablo 2’de belirtilen parametrelere göre üretilmiştir (Şekil 2). Dispersiyonun mekanik özelliklerini değerlendirmek için ilgili parametrelerde üretilen numune üzerinden 4 test numunesi hazırlanmıştır. Çekme ve çentik darbe numuneleri, lazer cihazının genel yönüne, yani biriktirme yönüne paralel olarak tasarlanmıştır. Çekme testine tabi tutulan 4 numunenin boyutları Tablo 3’de verilmiştir. Çentik darbe test numunelerine U çentik açılmıştır ve kesit alanları 10 mm x 5,76 mm’dir. Çekme ve çentik darbe test numuneleri Tel Elektro Erozyon Makinesi kullanılarak hazırlanmıştır.

Boncuklar uzunlamasına ve her zaman aynı yönde yerleştirildi. Örtülü kafa, başlangıçtan bitiş noktasına kadar yatırıldı ve ardından tekrar yatırmaya başlamak için başlangıç noktasına geri döndü. 5 kattan sonra 3 dakika, 10 kattan sonra 4 dakika, 15 kattan sonra 6 dakika gecikme olacak şekilde planlandı. Raster tarama stratejisi kullanıldı.



**Şekil 2:**

a) Üretim parametrelerine göre hazırlanmış kaplama numunesi, b) Kullanılan raster takım yolu stratejisi

IN718'in ilgili parametrelerinin sertlik değerlerini ve mikro yapısını analiz etmek için Şekil 3a'da gösterildiği gibi numunelerin dikey kesitleri alınmıştır. Kaplanan numuneler Tel Elektro Erozyon Makinesi (Electrical Discharge Machining) kullanılarak kesilmiş, ardından taşlanmış ve parlatılmıştır. Çekme – çentik darbe testi sonucu kırılan yüzeylerin ve IN718 kaplamanın farklı konumlardaki elementel bileşimini belirlemek için Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) kullanıldı. Bu çalışma kapsamında optik mikroskop (OM, G40x, Olympus) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile IN718 kaplamanın makro ve mikro morfolojisi incelenmiştir.

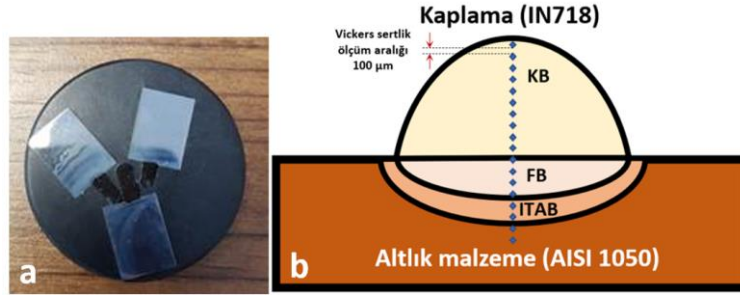
SEM görüntüleri ve elementel analizi Bursa Teknoloji Koordinasyon ve Ar-Ge Merkezi'nde (Bursa, TÜRKİYE) Hitachi TM3000 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM+EDX) ile incelenmiştir.

**Tablo 3. Çekme testi numunelerin ölçüleri**

	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Uzunluk (mm)	A <sub>0</sub>
1. Numune	3,0	5,9	20	17,5
2. Numune	2,9	5,9	20	17,3
3. Numune	2,9	5,9	20	17,1
4. Numune	3,0	5,9	20	17,3

Mikrosertlik, 50 g yükte, 100 mikron aralıklarla ve 10 s bekleme süresiyle (OSTİM Teknik Üniversitesi makine laboratuvarı) Vickers sertlik test cihazı kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 3b).

Kırık yüzeylerin SEM görüntüleri ve elementel analizi Bursa Teknoloji Koordinasyon ve Ar-Ge Merkezi'nde (Bursa, TÜRKİYE) Hitachi TM3000 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM+EDX) ile incelenmiştir.

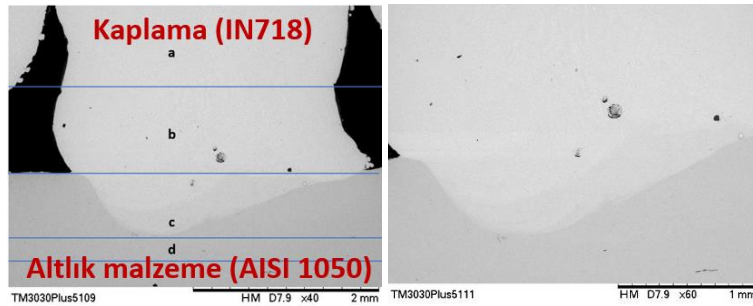


**Şekil 3:**  
a) Dikey yönde kesilmiş örnekler, b) şematik resim

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. Kaplamalı katmanların mikroyapısal ve sertlik analizi

Şekil 4, Tablo 2'de belirtilen parametrelere göre üretilen numunenin enine kesitin morfolojik profillerini göstermektedir. Enine kesit morfolojisi belirgin bir şekilde üç bölgeye ayrılabilir: a ve b Kaplama bölgesi (KB), c füzyon bölgesi (FB) ve d ısı tesiri altındaki bölge (ITAB). Numunede belirgin gözenekler ve makro çatlaklar yoktur (Aydın et al. 2022).



**Şekil 4:**  
Lazer dolgu kaynağı enine kesit görüntüsü

Tablo 2’de belirtilen parametrelerde üretilen numunenin KB, FB ve ITAB bölgelerinin SEM mikrografları detaylı olarak Şekil 5’de sunulmaktadır. Bu şekillerde kaplamanın tepesinden alt tabakaya kadar lazer kaplamanın mikro yapısını gösterilmiştir. Tüm numunelerin mikrografları, düzgün olmayan sütunlu dendritlerden ve sıkı paketlenmiş eş eksenli dendritlerden oluşan tipik bir dendritik mikro yapı gösterir. Dendritik bir mikro yapının oluşmasının nedeni bölgesinin aşırı soğumasıdır. Arayüze ve yüzeye yakın bölgelerde ana yapı çoğunlukla hücrelidir. Bununla birlikte, dendritin morfolojisi, kaplamaların KB ve FB’leri arasında önemli bir farklılık gösterir (Lu et al. 2021). Açıkça görülebilir ki, eş eksenli dendritin tüm kaplamaların KB’sinde (Şekil 5a<sub>1</sub> ve 5b<sub>1</sub>), sütunlu dendrit ise tüm kaplamaların FB’sinde meydana gelir (Şekil 5c<sub>1</sub>). KB ve FB arasındaki bu mikro yapı ayrımı, katılma teorisine dayalı olarak sıcaklık gradyanının (G) büyüme hızına (R) oranından kaynaklanmaktadır. Dendritin eş eksenli büyümesi düşük bir G/R oranında görülürken, sütunlu büyüme yüksek bir G/R oranında meydana gelir (Aydogan et al. 2021).

Alt malzemenin erimiş havuza kıyasla nispeten düşük sıcaklığa sahip olması nedeniyle, erimiş havuz ile alt malzeme arasında sürekli ısı iletimi meydana gelir ve bu da erimiş havuzun tabanında maksimum G değerine neden olur. Dolayısıyla G/R oranı bu alanda maksimum değere sahiptir. Eriyik havuzunun tabanında yapısal aşırı soğumanın neredeyse hiç olmadığını ve özel katılma koşullarının düzlemsel kristal üretimine yol açtığını gösterir (Xu et al. 2021). Katılma süreci devam ettikçe G/R azalır. Erimiş havuzda yapısal aşırı soğutma bölgesi oluşturması ince hücreli dendritlerin büyümesine neden olur. Erimiş havuzun tepesinde, G/R oranı daha da azalır ve erimiş havuz ile çevredeki ortam arasındaki ısı iletimi meydana gelir. Alt katmanın üst katman üzerindeki yeniden eritme ve yeniden ısıtma etkileri, sütunlu dendritlerin ince hücreli dendritlere dönüşmesine neden olan sıcaklık gradyanını ve katılma oranını değiştirir. Ayrıca, katılmış yapıların boyutu G×R ile ilişkilidir. G×R ne kadar büyükse, mikro yapılar o kadar incedir (DeRoy et al. 2018). Bu koşullar altında katılma sırasında soğutma cephesindeki eriyik bölgesi, alaşım elementleri yönünden zengin hale gelir. Sıcaklık gradyanı azalmış ve eriyik havuzundan kaplamaya yakın alana doğru büyüme hızı artmıştır. Katılma sürecinin ilk aşamasında, alt malzeme bir soğutucu görevi görür, erimiş havuzun tabanındaki sıcaklık gradyanı diğer bölgelerden daha yüksektir. Bu nedenle, kaplamaların FB’sinde sütunlu dendritler oluşur ve sıcaklık gradyanı yönünde büyürler. Buna karşılık, katılmanın son aşamasında, eriyik havuzunun ısı dağılımı, yüksek sıcaklıktaki alt katılmış yapı tarafından engellendiğinden, KB’nin sıcaklık gradyanı FB’de daha düşüktür, bu da kaplamaların KB’sinde eş eksenli dendritlerin oluşmasına neden olmuştur (Y. Zhang et al. 2013).

Östenitik matristeki Nb konsantrasyonu normalde ağırlıkça %2 ila 3’tür ve bu, IN718 alaşımındaki ağırlıkça yaklaşık %4’lik ortalama konsantrasyondan daha düşüktür. Bu nedenle, Laves’teki Nb ayrımının büyük miktarlarda Nb tükettiği ve bunun da matriste Nb tükenmesine neden olduğu sonucuna varılmıştır (Qi et al. 2009).

Beyaz kısım Laves, gri kısım ise östenitdir. Laves’in her bölgedeki hacim oranı Şekil 5(a<sub>2</sub>,b<sub>2</sub>,c<sub>2</sub> ve d<sub>2</sub>) gösterilmiştir. Şekil 5’de biriktirilmiş kaplamadaki Laves morfolojisi, alt bölgedeki dendritlerden üst bölgedeki eş eksenli kristale kadar değişir.

Farklı bölgelerdeki Laves fazlarının kantitatif metalografisinin sonuçları, yukarı bölgedeki (Şekil 5a<sub>2</sub>) Laves konsantrasyonunun orta bölgedeki (Şekil 5b<sub>2</sub>) ve aşağı bölgedeki (Şekil 5c<sub>2</sub>) Laves konsantrasyonundan daha yüksek olduğunu göstermektedir.

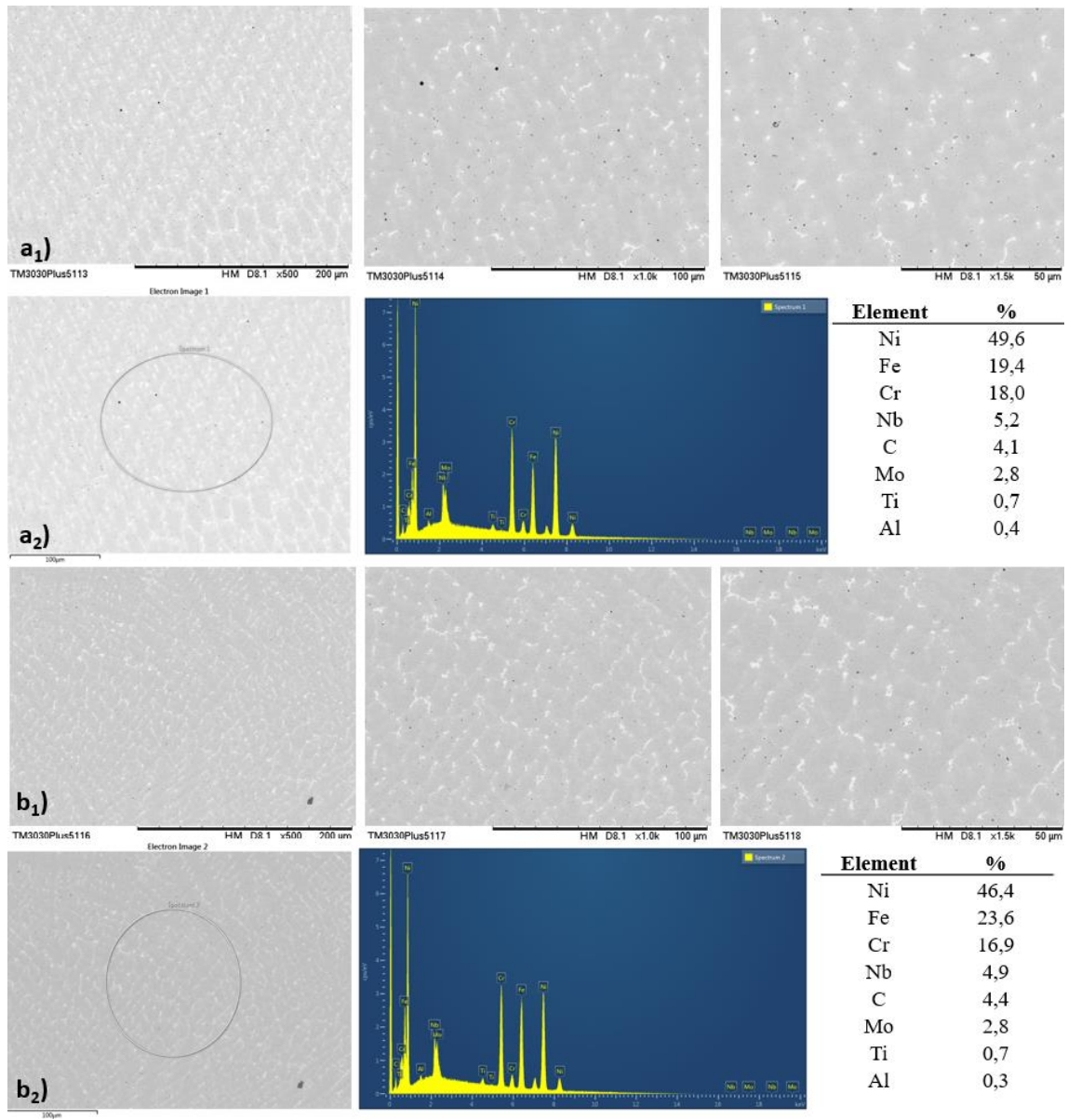
Nb ve Mo’nun ayrılması hem Nb hem de Mo’nun Laves fazının önemli yapıları olmasına bağlanabilir. Laves genellikle A<sub>2</sub>B biçiminde kabul edilir, burada A sırasıyla Ni, Fe ve Cr’yi ve B sırasıyla Mo, Nb ve Ti’yi temsil eder. Yüksek Nb konsantrasyonu, çökelmenin Laves fazı olduğunu doğrular (Y. Zhang et al. 2013).

Nb, IN718 alaşımında Laves fazının oluşumu için kritik bir elementtir ve faz geçişinin bu elementin ayrılmasına bağlılığına atfedilir.

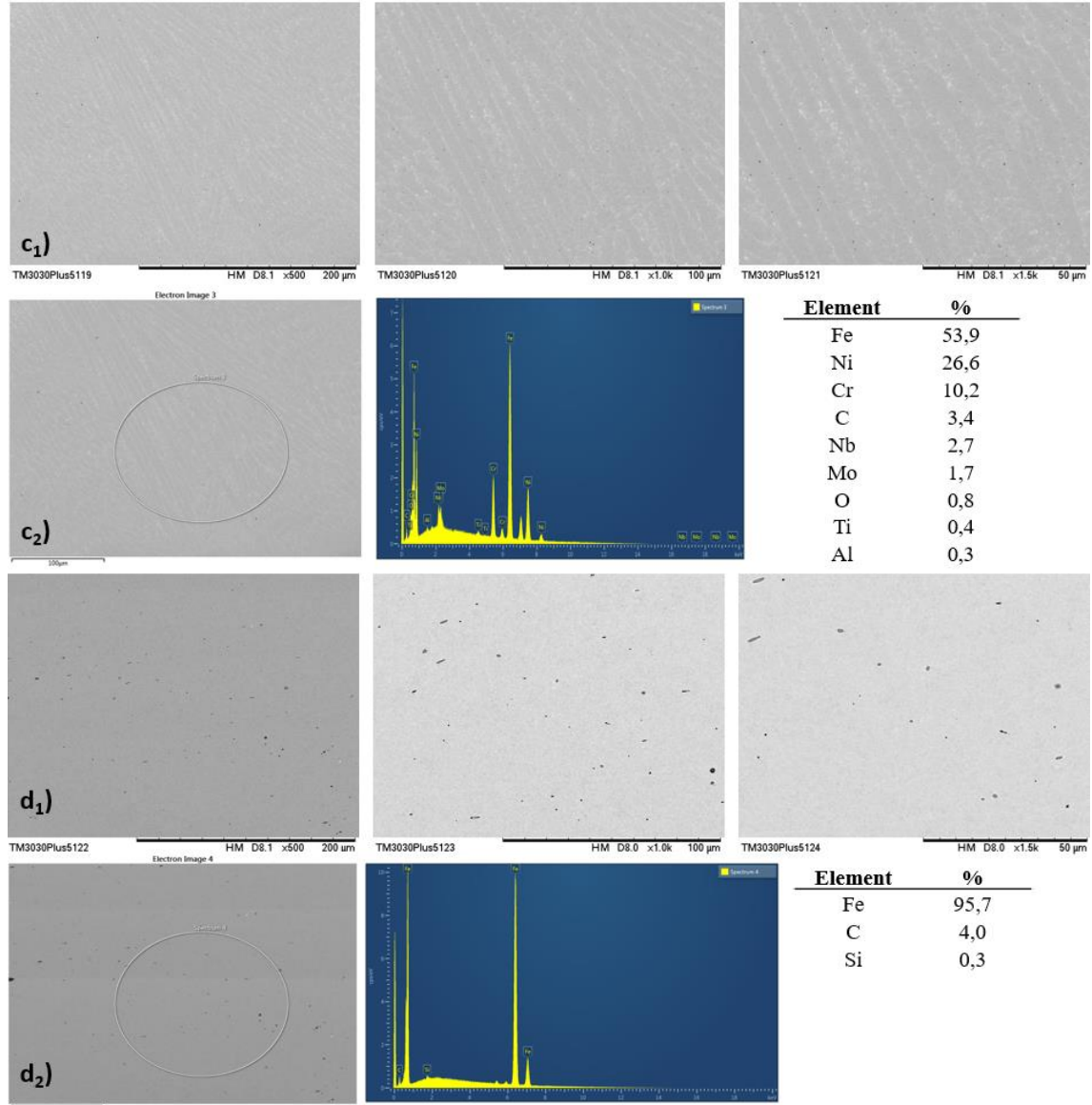
Şekil 5, IN718 örneğinin enine kesitinin mikro yapılarını göstermektedir. Düşük büyütme mikroskopisi resminden kademeli ayrı tortu katmanları gözlemlenebilir (Şekil 5a).



Biriktirme katmanları, katman arayüzünde oluşturulan ince yeniden erimiş çekirdeklenme bölgelerinin bantları ile belirlenir. Katman tabakası boyunca yoğun şekilde büyümüş dendritik taneler de ara sıra görülebilir. Yüksek büyütme oranlı SEM görüntülerinde, birikmiş malzemenin ayrıntılı mikro yapısını gösterir; burada ince ikincil dendritler, yaklaşık  $5\mu$  civarında ortalama bir dendrit kolu aralığına sahip tane içinde oluşmaktadır (Jelvani et al. 2019a). Koyu östenit matrisinin aksine, interdendritik sınırlar boyunca çökelmiş küresel ve düzensiz şekillerdeki küçük beyaz parçacıklar görülebilir. Laves fazı ve hızlı katılaşma sürecinde ayrılan bazı küçük MC ve TiN fazları olarak tanımlanırlar (Ya). Şekil 5(a<sub>2</sub>,b<sub>2</sub>,c<sub>2</sub>), mikro yapıda görünen ana fazlar üzerindeki elementel analizini göstermektedir. Elementel analiz incelendiğinde dendritin çekirdek alanının matrisinin Fe, Cr ve Ni açısından zengin olduğu, beyaz ayrışma parçacıklarının ise Nb, Mo ve Ti açısından zengin olduğu gözlemlenebilir ve bu elementlerinde Laves fazının ana bileşimsel unsurlarıdır (Qi et al. 2009).

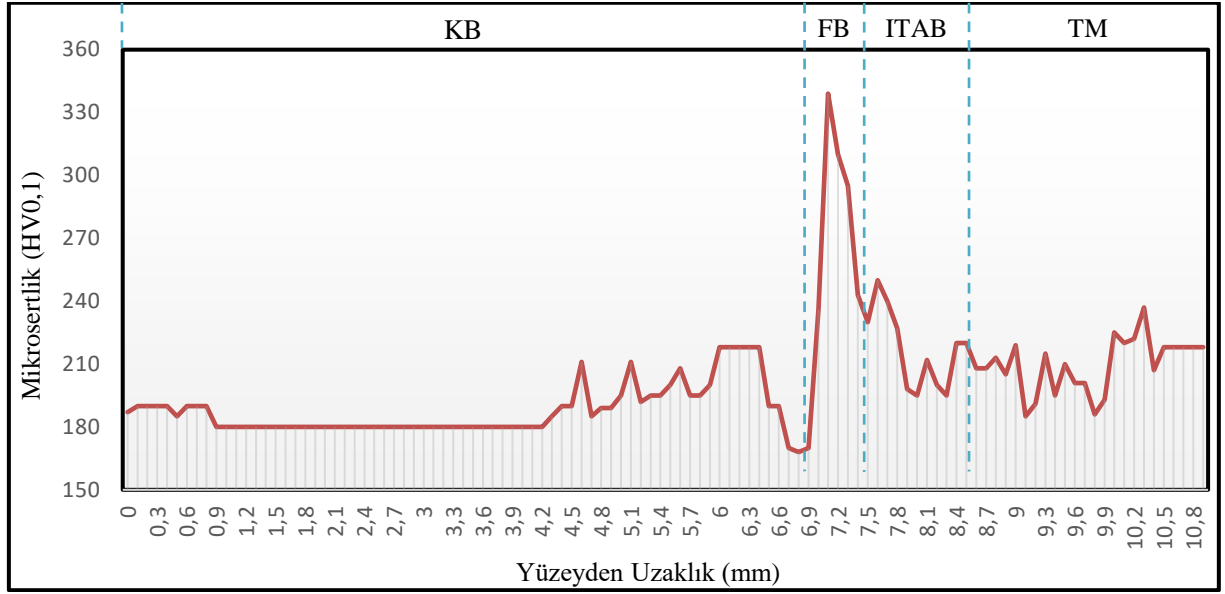




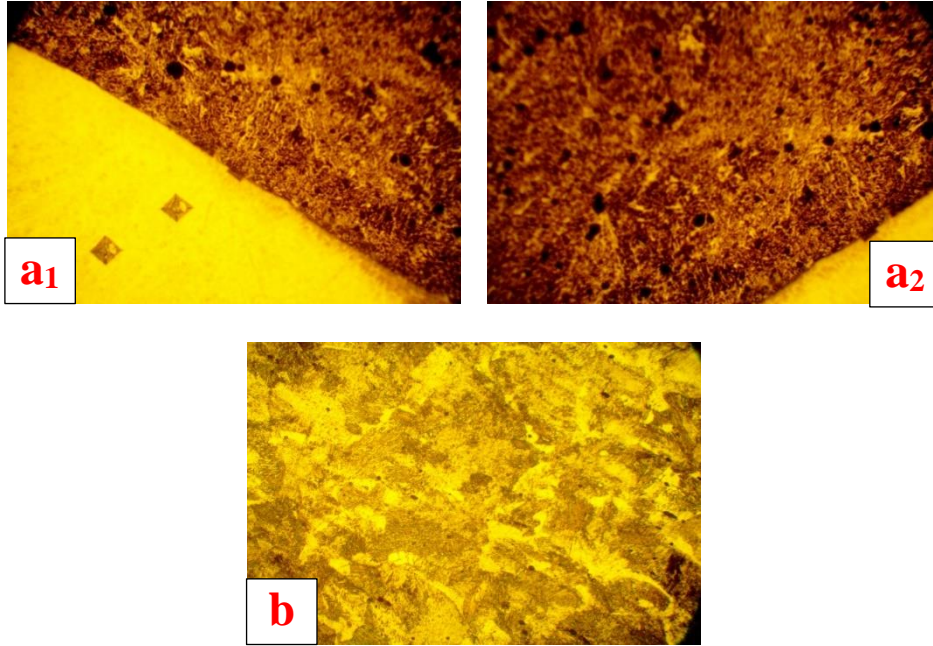


**Şekil 5:**  
Lazer Dolgu Kaynağı IN718'nin enine kesit mikro yapısı ve elementel analizi (a) ve (b) KB (c)  
FB (d) ITAB

Sertlik, bir malzemenin deformasyona, özellikle plastik deformasyona ve girintiye direnme yeteneğini gösterir. Şekil 6'da görülebileceği gibi, mikrosertlik değerlerinin dağılımı temel olarak üç alana ayrılmıştır: Kaplama bölgesi (KB), füzyon bölgesi (FB) ve ısı tesiri altındaki bölge (ITAB). Çok katmanlı kaplama işlemi sırasında penetrasyon parçası sürekli olarak ısıtılır ve hızla soğutulur; bu, tekrarlanan ısıl işleme eşdeğerdir ve ısıdan etkilenen bölgede yüksek sertlikle sonuçlandırmıştır (J. Zhang et al. 2022).



**Şekil 6:**  
Kaplama yüzeyinden alt tabakaya kadar mikrosertlik profili



**Şekil 7:**  
Numunenin ITAB bölgesinin optik mikroskop görüntüleri a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>) yapışma bölgesi, b) temel malzeme

Şekil 6, numunenin sertlik dağılımını göstermektedir. Mikrosertliğin yüzeye yakın yerlerde yüksek olduğu ve yüzeyden uzaklaştıkça giderek azaldığı görülmektedir. Sertlik değişiminin Laves faz morfolojisinden etkilendiği görülmektedir. Kaplamaların gelişmiş mikrosertliği, MoNiSi ve MoFeSi fazlarının varlığına bağlanabilir.

Sertlik sonuçlarında da görüldüğü gibi ısıdan etkilenen bölgenin sertlik değeri alt tabakaya göre oldukça yüksektir (Shayanfar et al. 2020).

Kaplama yüzeyinin en yüksek termal gradyanı nedeniyle kaplamının üst tabakasının sertlik değeri alt tabakalara göre daha yüksektir. Eriyik havuzunun katılma hızı (R), yüzeyden

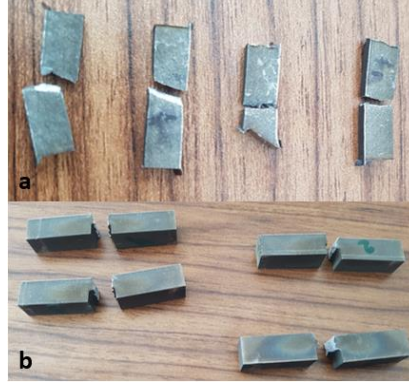
içeriye doğru azalır. Tersine, termal gradyan (G) yüzeyden içe doğru artar. Bu nedenle G/R değeri yüzeyden içe doğru artar. Sonuç olarak, tane merkeze doğru giderek daha kaba hale gelir ve mikrosertlik giderek azalır. Ek olarak, termal döngüden sonra söndürme etkisi nedeniyle ITAB da temel malzemeden daha serttir (Wolff et al. 2019).

FB’de ITAB’a göre daha hızlı soğuma, sertlik değerlerinin daha yüksek olmasına neden olur. ITAB’da meydana gelen en yüksek sıcaklık FB’ne göre daha düşük olduğu için daha yavaş bir soğuma meydana gelir ve dendritik tane yapısının hücreden kolona, eş eksenli tanelerin ince tanelen iri taneye doğru değiştiği gözlenir.

Yapışma bölgesinin mikrosertliği de ısıdan etkilenen bölgeninkinden daha yüksektir. Bu, kaplama tozunun alt tabakaya seyreltilmesi ile açıklanabilir. Ek olarak, termal döngüden sonra söndürme etkisi nedeniyle ITAB’de temel malzemeden daha serttir. Şekil 7, substratın esas olarak poligonale ostentit tanelerinden oluştuğu, ITAB’larda çita şeklindeki martenzitin yaygın olarak gözlemlendiği söylenebilir (Şekil 7). Bu, temel malzemenin östenitin çita martenzite dönüştürüldüğünü gösterir. Kübik yapıdan, dörtgen yapıya dönüşüm, hacimde büyük artışa yol açar. Bu nedenle, martenzit ITAB alt tabakadan daha yüksek bir sertliğe sahiptir (Zeng et al. 2021).

### 3.2. Çekme ve darbe testleri

Çekme ve çentik darbe testi sonucu kırılan numunelerin resimleri Şekil 8’de gösterilmiştir. Dört numunenin kırılma noktası orta bölgededir. Bu nedenle testlerin sonuçları geçerlidir.



**Şekil 8:**  
*Test sonucu kırılan numuneler a) çekme testi, b) darbe testi*

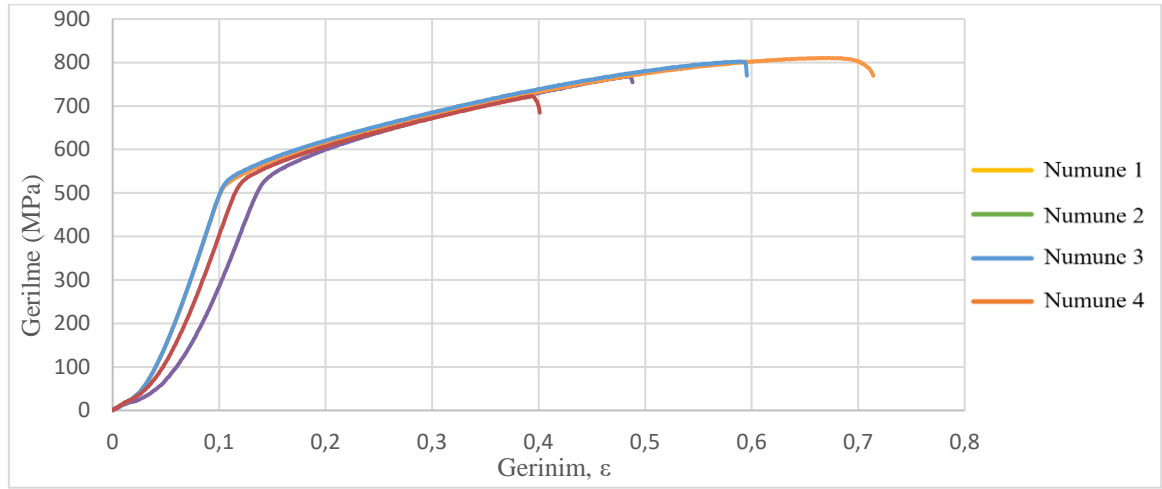
Çekme testi sonuçları Tablo 4 ve Şekil 9’da gösterilmektedir. Tek bir blok üzerinden alınan 4 numunenin test sonuçlarının özeti: (1) En yüksek kopma gerilmesi 810,3 MPa ve maksimum fark 10,8 % (2) En yüksek akma dayanımı 532,4 MPa ve maksimum fark 1,2 % (3) En yüksek uzama 25,9 % ve maksimum fark 46 %.

Sonuçlar ayrıca kopma gerilmesi ve süneklik için nispeten yüksek sapmalar olduğunu göstermektedir. Bu dağılım, biriken malzemede gözenekliliğin varlığından kaynaklanabilir. Ayrıca, en iyi sonuçlar merkez bölgeden alınan numunelerden alınırken, dış bölgelerden alınan numuneler üzerinde yapılan testler hem kopma gerilmesi hem de süneklik için daha düşük değerler göstermiştir. Bu, lazer kaplama işleminde meydana gelen kenar etkilerine atfedilir, çünkü kenarlardaki sıcaklık gradyanları, parçaların iç alanlarındakilerden daha yüksektir (Kang et al. 2022).

**Tablo 4. Kaplama numunesinden elde edilen 4 numunenin mukavemet değerleri**

	Kopma Gerilmesi (MPa)	Akma Gerilmesi (MPa)	Uzama (%)	Darbe enerjisi (J)
1. Numune	767,6	532,4	21,8	31,0
2. Numune	810,3	513,5	33,7	44,3
3. Numune	802,5	518,6	25,9	35,0
4. Numune	722,4	526,1	18,2	16,0
Aritmetik ortalama	775,7	522,7	24,9	31,6
Fark	10,8%	1,2%	46,1%	63,9%

Çekme özelliklerindeki farklılıklar, kristalografik doku, tane boyutu ve çökeltilerin dağılımı gibi kusurlardaki farklılıklara bağlanır (Lambarri et al. 2013).

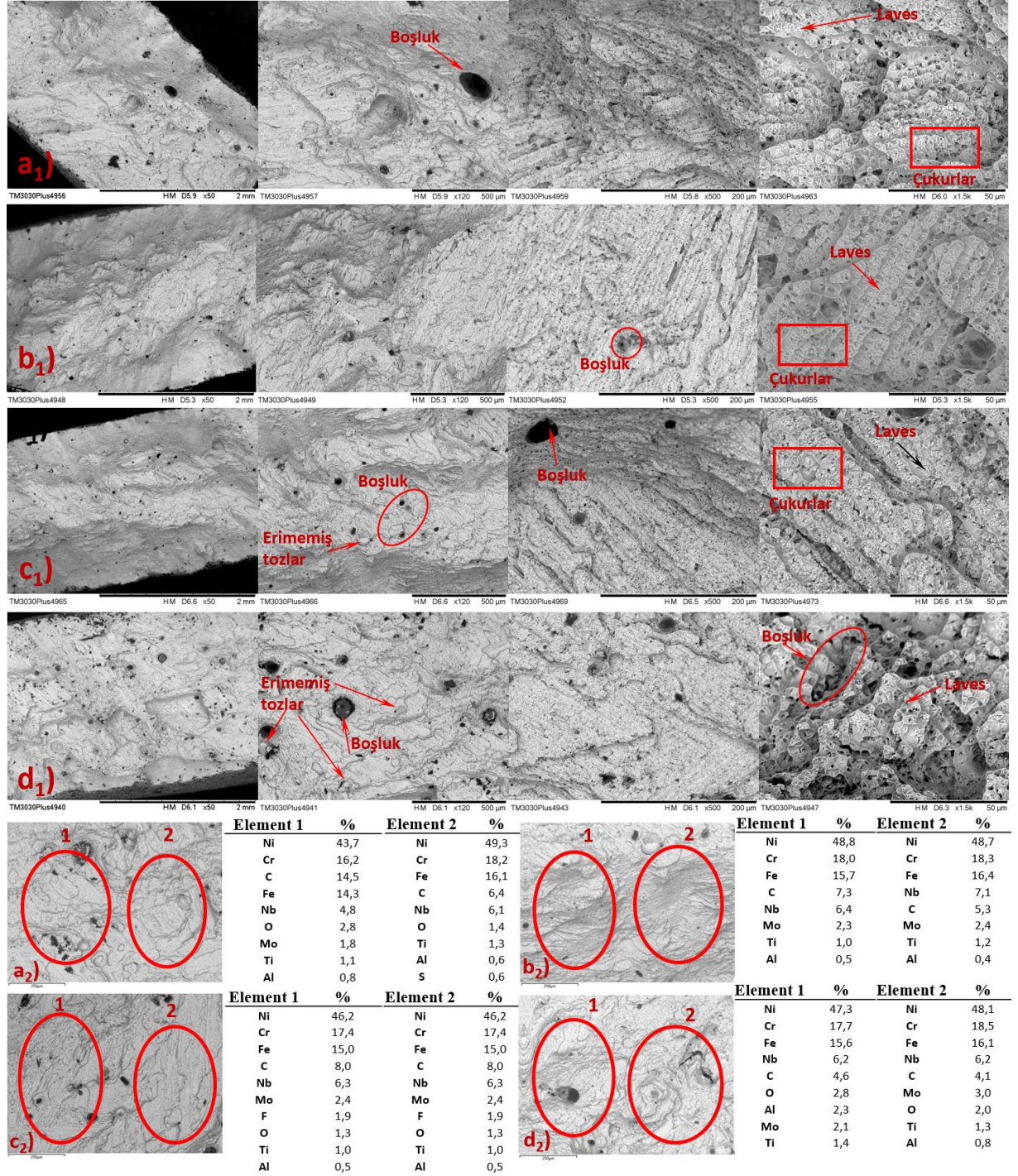


**Şekil 9:**

*Kaplama numunesinden elde edilen 4 numunenin çekme testi sonuçları*

Şekil 10, test edilen numunelerin çekme testi sonucunda kırılan yüzeylerinin SEM-EDS analizini göstermektedir. Test edilen numunelerin kırılma yüzeyleri SEM altında incelenmiştir. Birikmiş kırılma yüzeyi, iyi bir uzama ile ilişkili bir transgranüler sünek kırılma modunu gösteren ince çukurlu bir yüzey sergilemiştir. Şekil 10'dan (a<sub>1</sub>-d<sub>1</sub>) ince çukurlarla tamamen sünek kırılma gösterdiği görülebilir. Ayrıca, çukurların içinde ikincil parçacıklar ve mikro boşluklar oluşmuştur. SEM, Laves fazı ve MC karbürler olduğu bilinen beyaz parçacıklardan oluşan tümseklere sahip sığ çukurlar gösterir. Bu, kırılmanın interdendritik bölgelerde veya tane sınırlarında meydana geldiğini ve nispeten kırılğan olduğunu gösterir. EDS analizinde görüldüğü gibi, ikinci parçacıklar MC karbürler ve Laves fazı Nb ve Mo elementleri açısından zengindi. EDS analizleri incelendiğinde 4 numune içerisinde oksijen oranı en yüksek olan 4 numaralı numunedir. Şekil 10d<sub>1</sub> incelendiğinde kırık yüzeyin gözenek yapısının diğer numunelere göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun temel nedeni "O" elementinin oranının yüksek olmasıdır (Zhou et al. 2021).





Şekil 10:

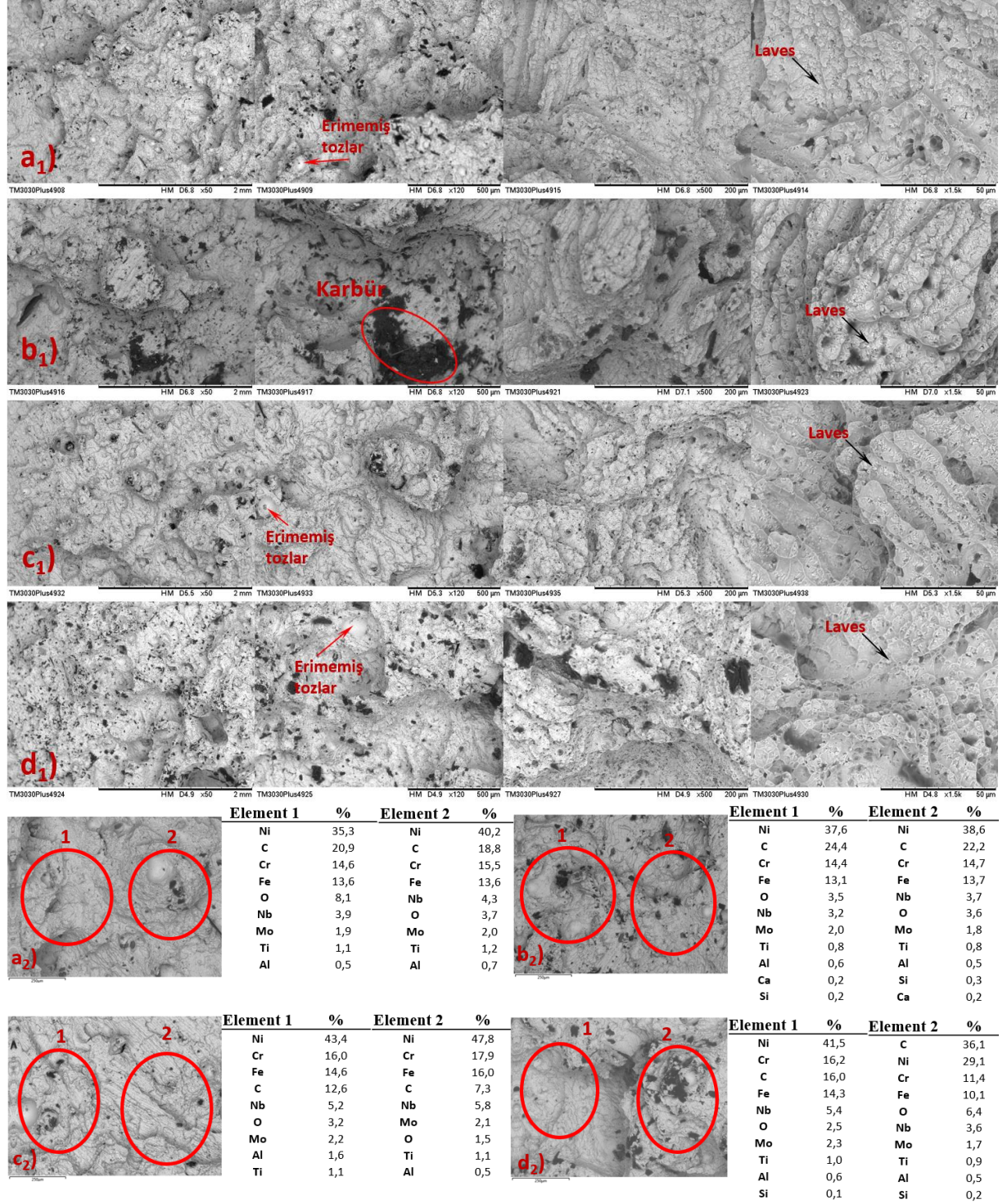
Çekme testi sonucu kırılan yüzeylerin (a) SEM görüntüleri, (b) Elementel analizi

Charpy darbe testlerinin sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Test sonuçları incelendiğinde maksimum ve minimum test sonuçları arasında 64 % bir fark olduğu görülmüştür.

Şekil 11'da Charpy çentik testi sonucu kırılan yüzeylerin SEM-EDS görüntüleri sunulmaktadır. Görüntüler incelendiğinde gözeneklerin olduğu görüldü. EDS analizi incelendiğinde oksijen elementinin varlığı tespit edilmiştir. Test sonuçlarındaki bu fark, esas olarak numunelerdeki oksijen içeriğinden ve buna bağlı olarak numunelerin gözenekli yapısından



kaynaklanmaktadır (Lee et al. 2022). Yüzeyde erimemiş Inconel tozları gözlemlendi. Bu erimeyen IN718 tozlarının bir sonucu olarak, 4 numune arasında darbe enerjilerinde bir fark oluştu. SEM görüntülerinde görüldüğü gibi yüzeydeki ince çukurlu yüzey, kırılma mekanizmasının tamamen sünek bir kırılma olduğunu göstermektedir. Çekme testi sonuçlarında bahsedildiği gibi darbe testi sonuçlarındaki bu farklılığa lazer kaplama işleminde meydana gelen kenar etkileri de ilave edilebilir.



**Şekil 11:**  
Darbe testi sonucu kırılan yüzeylerin (a) SEM görüntüleri, (b) Elementel analizi

#### 4. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, AISI 1050 çeliği üzerine IN718 lazer kaplamasının morfolojisi, mikroyapısı ve mekanik karakterizasyonu değerlendirildi. Bazı önemli sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

IN718 alaşımlı kaplamaların dikey kesiti üç bölgeye ayrıldığı ve bu bölgelerin mikro yapıları arasında farklar olduğu görülmüştür. Katmanların mikro yapısı, sütunlu dendritik ve eş eksenli dendritik yapılardan oluştuğu görülmüştür. KB ve FB arasındaki bu mikro yapı ayrımı, katlaşma teorisine kaynaklandığı görülmüştür. Kaplamaların FB'sinde sütunlu dendritler oluşurken KB'de eş eksenli dendritler görülür.  $G \times R$  değeri büyüdükçe, mikro yapılar incelendiği belirtilmiştir.

FB'nin mikrosertliği ITAB'dan daha yüksektir. Bu, kaplama tozunun alt tabakaya seyreltilmesi ile açıklanmıştır. Termal döngü nedeniyle, ITAB temel malzemeden daha sert olduğu açıklanmıştır.

Çekme testi sonuçlarına göre 4 numunenin; kopma gerilmesi fark 11 %, akma dayanımı farkı 1,2 % ve uzama farkı 46 % olduğu görülmüş ayrıca, en iyi sonuçları merkez bölgeden alınan numuneler göstermiştir. Bu sonuçlar, kenarlardaki numunelerin sıcaklık gradyanları, parçaların iç alanlarındakilerden daha yüksek olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

#### YAZAR KATKISI

Çalışmanın yazarlarından Ali ARI çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri analizi ve yorumlama ayrıca eleştirel inceleme ve makale yazımı aşamalarında, Ali BAYRAM veri toplama, veri analiz ve yorumlama, eleştirel inceleme, makale tasarımı ve makale kontrol kısımlarında, Taner KARAGÖZ literatür taraması, veri toplama, işleme ve analizinde ve makale tasarımı, Orhun ARSLAN literatür taraması, veri toplama, işleme ve analizinde ve makale tasarımı katkı sağlamıştır. Çalışmanın son onay ve tam sorumluluğunu tüm yazarlar üstlenmektedir.

#### NOT

Bu çalışma Ostim Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Tarafından Desteklenmiştir. Proje Numarası: BAP202316

#### KAYNAKLAR

1. Alizadeh-Sh, M., Marashi, S.P.H., Ranjbarnodeh, E., Shoja-Razavi, R. ve Oliveira, J.P. (2020) Prediction of solidification cracking by an empirical-statistical analysis for laser cladding of Inconel 718 powder on a non-weldable substrate. *Optics & Laser Technology*, 128, 106244. doi:10.1016/J.OPTLASTEC.2020.106244
2. Aydin, H., Altay, M., Karşı, A., Ergin, D., Onayli, A. ve Bayram, A. (2022) Effect of Laser Cladding Parameters in Laser Direct Metal Deposition (LDMD) of Martensitic Stainless Steel Powder on Ductile Cast Iron. *Lasers in Engineering*, 52(3), 87–106.
3. Aydogan, B., O'Neil, A. ve Sahasrabudhe, H. (2021) Microstructural and mechanical characterization of stainless steel 420 and Inconel 718 multi-material structures fabricated using laser directed energy deposition. *Journal of Manufacturing Processes*, 68(PA), 1224–



1235. doi:10.1016/j.jmapro.2021.06.031

4. DebRoy, T., Wei, H.L., Zuback, J.S., Mukherjee, T., Elmer, J.W., Milewski, J.O., Beese, A.M., Wilson-Heid, A., De, A. ve Zhang, W. (2018) Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112–224. doi:10.1016/J.PMATSCI.2017.10.001
5. Gao, Z., Wang, L., Wang, Y., Lyu, F. ve Zhan, X. (2022) Crack defects and formation mechanism of FeCoCrNi high entropy alloy coating on TC4 titanium alloy prepared by laser cladding. *Journal of Alloys and Compounds*, 903, 163905. doi:10.1016/J.JALLCOM.2022.163905
6. Ilanlou, M., Shoja Razavi, R., Nourollahi, A., Hosseini, S. ve Haghghat, S. (2022) Prediction of the geometric characteristics of the laser cladding of Inconel 718 on the Inconel 738 substrate via genetic algorithm and linear regression. *Optics & Laser Technology*, 156, 108507. doi:10.1016/J.OPTLASTEC.2022.108507
7. Jelvani, S., Shoja Razavi, R., Barekat, M., Dehnavi, M. R. ve Erfanmanesh, M. (2019) Evaluation of solidification and microstructure in laser cladding Inconel 718 superalloy. *Optics & Laser Technology*, 120, 105761. doi:10.1016/J.OPTLASTEC.2019.105761
8. Poloczek, T., Lont, A. ve Górka, J. (2022) The structure and properties of laser-cladded Inconel 625/TiC composite coatings. *Materials*, 16(3), 1265. doi: 10.3390/ma16031265
9. Kang, L., Chen, F., Wu, B., Liu, X. ve Ge, H. (2022) Mechanical properties and microstructure of laser-cladding additively manufactured 316L stainless steel sheets. *Journal of Constructional Steel Research*, 199, 107603. doi:10.1016/J.JCSR.2022.107603
10. Lambarri, J., Leunda, J., García Navas, V., Soriano, C. ve Sanz, C. (2013) Microstructural and tensile characterization of Inconel 718 laser coatings for aeronautic components. *Optics and Lasers in Engineering*, 51(7), 813–821. doi:10.1016/j.optlaseng.2013.01.011
11. Lee, K.K., Kim, H.S., Ahn, D.G. ve Lee, H. (2022) Thermo-mechanical characteristics of inconel 718 layer deposited on AISI 1045 steel substrate using a directed energy deposition process. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 293–309. doi:10.1016/j.jmrt.2021.12.112
12. Lu, S., Zhou, J., Wang, L. ve Liang, J. (2021) Influence of MoSi<sub>2</sub> on the microstructure and elevated-temperature wear properties of Inconel 718 coating fabricated by laser cladding. *Surface and Coatings Technology*, 424(August), 127665. doi:10.1016/j.surfcoat.2021.127665
13. Muvvala, G., Mullick, S. ve Nath, A.K. (2020) Development of process maps based on molten pool thermal history during laser cladding of Inconel 718/TiC metal matrix composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 399, 126100. doi:10.1016/J.SURFCOAT.2020.126100
14. Ning, J., Zhang, H.B., Chen, S. M., Zhang, L.J. ve Na, S.J. (2021) Intensive laser repair through additive manufacturing of high-strength martensitic stainless steel powders (I) – powder preparation, laser cladding and microstructures and properties of laser-cladded metals. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 5746–5761. doi:10.1016/J.JMRT.2021.10.109
15. Qi, H., Azer, M. ve Ritter, A. (2009) Studies of standard heat treatment effects on microstructure and mechanical properties of laser net shape manufactured INCONEL 718. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 40(10), 2410–2422. doi:10.1007/s11661-009-9949-3

16. Shayanfar, P., Daneshmanesh, H. ve Janghorban, K. (2020) Parameters Optimization for Laser Cladding of Inconel 625 on ASTM A592 Steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 8258–8265. doi:10.1016/j.jmrt.2020.05.094
17. Thawari, N., Gullipalli, C., Katiyar, J.K. ve Gupta, T.V.K. (2021) Effect of multi-layer laser cladding of Stellite 6 and Inconel 718 materials on clad geometry, microstructure evolution and mechanical properties. *Materials Today Communications*, 28, 102604. doi:10.1016/J.MTCOMM.2021.102604
18. Wang, C., Zhou, J., Zhang, T., Meng, X., Li, P. ve Huang, S. (2022) Numerical simulation and solidification characteristics for laser cladding of Inconel 718. *Optics & Laser Technology*, 149, 107843. doi:10.1016/J.OPTLASTEC.2021.107843
19. Wolff, S.J., Gan, Z., Lin, S., Bennett, J.L., Yan, W., Hyatt, G., Ehmann, K.F., Wagner, G.J., Liu, W.K. ve Cao, J. (2019) Experimentally validated predictions of thermal history and microhardness in laser-deposited Inconel 718 on carbon steel. *Additive Manufacturing*, 27, 540–551. doi:10.1016/j.addma.2019.03.019
20. Xu, D., Wang, H., Tao, X., Yao, Z., Zhang, S. ve Oleksander, M. (2021) Investigation on Microstructure, Hardness and Wear Resistance of Electron Beam Wire-Feeding Deposited Inconel 718 Alloy Coatings. *Metals and Materials International*, 27(5), 1263–1272. doi:10.1007/s12540-019-00494-x
21. Mathoho, I., Akinlabi, E.T., Arthur, N. ve Tlotleng, M. (2020) Impact of DED process parameters on the metallurgical characteristics of 17-4 PH SS deposited using DED. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 31, 450–458. doi:10.1016/j.cirpj.2020.07.007
22. Zeng, X., Wang, Q., Chen, C., Lian, G. ve Huang, X. (2021) Effects of WC addition on the morphology, microstructure and mechanical properties of Fe50/TiC/WC laser claddings on AISI 1045 steel. *Surface and Coatings Technology*, 427(September), 127781. doi:10.1016/j.surfcoat.2021.127781
23. Zhang, J., Meng, G., Zhu, L., Yang, Z., Xue, P. ve Xu, P. (2022) Formation mechanism and mechanical properties of TiC reinforced Inconel 718 composite coatings by laser cladding on H13 steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121, 3597–3611. doi:10.1007/s00170-022-09545-x
24. Zhang, Y., Li, Z., Nie, P. ve Wu, Y. (2013) Effect of heat treatment on niobium segregation of laser-cladded IN718 alloy coating. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 44(2), 708–716. doi:10.1007/s11661-012-1459-z
25. Zhou, S., Xu, T., Hu, C., Wu, H., Liu, H. ve Ma, X. (2021) Effect of different topologies on microstructure and mechanical properties of multilayer coatings deposited by laser cladding with Inconel 625 wire. *Surface and Coatings Technology*, 421(April), 127299. doi:10.1016/j.surfcoat.2021.127299

