



## LAZER KAPLAMA PROSESİ ve PROSES PARAMETRELERİ: DERLEME ÇALIŞMASI

Çiğdem DİNDAR\*   
Meryem ALTAY\*\*   
Hakan AYDIN\*\* 

Alınma: 22.09.2020; düzeltme: 17.06.2021; kabul: 08.07.2021

**Öz:** Günümüz lider üretim teknolojilerinden biri olan lazer kaplama prototip, onarım ve imalat uygulamalarında kullanılmakta olup havacılık, uzay, otomotiv, savunma sanayi, tıp vb. alanlarda geniş uygulama alanına sahiptir. Üretim yöntemi, lazer ışını kullanılarak toz malzemenin ergimesi ve temel malzeme ile nüfuziyetine dayanmaktadır. Lazer kaplama prosesinde, malzemenin nihai kalite özellikleri işlem parametrelerinden doğrudan etkilenmektedir. Bu parametrelerin önemi, malzeme makro ve mikro yapısının incelenmesi üzerine yapılan çalışmalarla ortaya konulmaktadır. Bu derleme çalışmada, lazer kaplama prosesi detaylı olarak incelenerek lazer gücü, ilerleme hızı, toz besleme hızı ve koruyucu gaz proses parametrelerinin kaynak bölgesine etkileri irdelenmiş olup literatürde yer alan sonuçlar derlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Lazer kaplama, Eklemeli imalat, Proses parametreleri, Malzeme onarımı.

### Laser Cladding Process and Process Parameters: A Review

**Abstract:** Laser cladding method, which is the one of leading manufacturing technologies of today, is used in various applications such as prototyping, product repair and material coating. It has a wide application areas: aviation, space, automotive, defense industry, medicine, etc. The production method is based on the melting of the powder material using a laser beam and its penetration with the substrate. In the laser cladding process, the final quality properties of the material are directly affected by the process parameters. The importance of these parameters is revealed by the studies on the macrostructure and microstructure of the material. In this review article, the laser cladding process has researched in detail, the effects of laser power, welding speed, powder feed rate, shielding gas process parameters on the welding area have examined, and the results obtained have given by gathered together.

**Keywords:** Laser cladding, Additive manufacturing, Process parameters, Repair of material.

## 1. GİRİŞ

Lazer kaplama teknolojisi, gelecek vaat eden etkili bir yüzey modifikasyon tekniğidir (T. Chen ve diğ., 2019). Üretim yöntemi prensibi, toz malzemenin ergiyerek temel malzeme ile doğrudan nüfuziyetine dayanır: metalik toz, malzeme besleme sistemi ile bir nozuldan temel malzemeye aktarılır, aynı anda lazer ışını ile metalik tozların ergimesi sağlanır (Li ve diğ., 2020).

\* TOFAŞ Ar-Ge Yeni Yalova Yolu Cad. No:574 Bursa/TÜRKİYE

\*\* Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü 16059 Nilüfer/BURSA

İletişim Yazarı: Çiğdem DİNDAR (cigdem.dindar@tofas.com.tr)

Lazer kaplama prosesinin içerisinde bulunduğu, Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu (ASTM) tarafından sınıflandırılan eklemeli imalat yöntemleri Şekil 1’de gösterilmektedir (Singh ve Ramakrishna, 2017). Bu prosesin diğer yöntemlerden temel farkı, malzeme ergitmede lazer ışını kullanmasıdır.

Eklemeli İmalat Prosesi							
Proses ve şematifi	Lazer Temelli Eklemeli İmalat Prosesi			Termal Ekstrüzyon	Malzeme Jeti	Malzeme Adezyonu	Elektron Işını
	Lazer Kaplama	Lazer Polimerizasyon					
Yöntem	SLS	DMD	SLA	FDM	3DP	LOM	EBM
	SLM	LENS	SGC	Robocasting	IJP	SFP	
	DMLS	SLC	LTP		MJM		
		LPD	BIS		BPM		
		HIS		Termojet			
Malzeme Tipi	Toz	Sıvı	Katı				

**Şekil 1:**

*Eklemeli imalat teknolojisi lazer kaynak sınıflandırması (Singh ve diğ., 2017)*

Son yıllarda lazer kaplama teknolojisi, aşınma direnci (Huang ve diğ., 2020; Quazi ve diğ., 2016), korozyon direnci (Fu ve diğ., 2020; Roy ve diğ., 2020; Wang ve diğ., 2020), oksidasyon direnci (Li-Yan ve diğ., 2020), ısıl yorulma dayanımı (Liu ve diğ., 2017) ve biyouyumluluk (Zheng ve diğ., 2008) gibi özellikleri elde etmek için uzay, havacılık, enerji, tıp, otomotiv ve makine sektörlerinde kullanılmaktadır (Zhu ve diğ., 2020). Ayrıca uçak iniş takımları ve gövde bileşenleri (Barr ve diğ., 2018), medikal implant (Weng ve diğ., 2014), türbin kanadı (Kaierle ve diğ., 2017), otomotiv çelikleri (Shi ve diğ., 2017) ve kalıp endüstrisinde de (Theron ve diğ., 2020) yaygın kullanımı bulunmaktadır.

Lazer kaplama küçük alanları iyileştirmek için son derece uygundur; belirli yüzey kalitesinde kaplama gereksinimlerini karşılayarak, yüzey kusurlarını onarmak için ideal bir yöntemdir. Ürünlerin hızlı bir şekilde imal edilebilmesi, teknik ve kalite gerekliliklerini karşılayabilmesi gibi yüksek kazanımlara sahiptir (Lourenço ve diğ., 2016). İyileştirme ve onarım uygulamaları birçok komponent için bulunmaktadır: kalıp (Chen ve diğ., 2014; Lu ve diğ., 2019; Taberero ve diğ., 2009), takım çelikleri (Locs ve diğ., 2017), motor krank mili (Ren ve diğ., 2013), demiryolu tekerleri (Zhu ve diğ., 2019), dişli çarklar (Liu ve diğ., 2017).

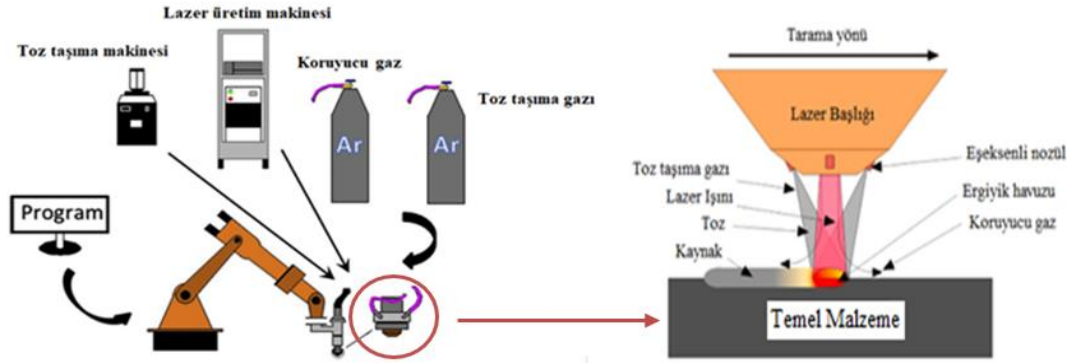
Geleneksel onarım yöntemlerine göre birçok avantajı bulunmaktadır: kontrollü ısı girişi, yüksek boyutsal doğruluk, esnek üretim yöntemi olması (Riveiro ve diğ., 2014), mekanik ve kimyasal özelliklerin geri kazanılabilmesi nedeniyle tercih edilmektedir (Liu ve diğ., 2017). Bahsedilen avantajlarının yanı sıra; onarım, imalat ve prototip aşamalarında dezavantajları da mevcuttur. Kaplamanın homojen olmaması yüzey kalitesini düşürmekte; gözenek (Zhan ve diğ., 2019), çatlak (Yu ve diğ., 2013), kalıntı gerilme (Chen ve diğ., 2012) gibi olumsuz özellikler oluşturabilmektedir. Ayrıca proses parametrelerinin optimize edilmesi de gerekmekte olan önemli bir husustur.

Lazer teknolojisi kullanılarak yapılan çalışmalarda hafif metaller, çelik ve dökme demirler (Bartkowski ve diğ., 2015), kompozit ve seramik malzemeler (Al-Hamdani ve diğ., 2020; Bu ve diğ., 2020; Chen ve diğ., 2020; Li-Yan ve diğ., 2020; Zhao ve diğ., 2020a) ve pek çok malzemenin yüzey özelliklerini değiştirmek mümkün olmaktadır.

## 2. LAZER KAPLAMA PROSESİ

Lazer kaplama prosesi, yüksek erime noktasına sahip malzemeleri dahi eritebilen güçlü bir lazer kaynağı ve besleme sisteminden (tel ya da toz malzeme) oluşan çok yönlü bir tekniktir (Marin ve diğ., 2020); lazer dolgu kaynağı ve doğrudan lazer metal biriktirme isimleriyle de bilinmektedir. Düşük ısı girdisi, yüksek katılma oranı, yüksek kaynak nüfuziyeti, fonksiyonel dereceli malzemelerin biriktirilmesi ve homojen yapı elde edilmesi özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir (Toyserkani ve diğ., 2017).

Lazer kaplama işleminde, yüksek güçteki lazer ışın kaynağı sayesinde ince bir tabaka (0.05-2 mm) oluşturularak kaynak gerçekleştirilir, Şekil 2’de lazer kaplama teknolojisi ve prensibi gösterilmiştir. Lazer başlığından çıkan lazer ışını, nozuldan aktarılan toz malzeme ve koruyucu gaz aynı anda temel malzemenin üzerine gönderilir; lazer ışını sayesinde toz ve temel malzeme ergiyerek kaynak havuzu oluşturur. Kaplama yapılmak istenilen bölge üzerinde lazer başlığı ilerletilerek işlem sürdürülür. Koruyucu gaz ergiyik havuzundaki malzemeyi oksitlenmeye karşı korumaktadır ve genellikle Argon gazı kullanılmaktadır (Zhu ve diğ., 2020; Li ve diğ., 2020).



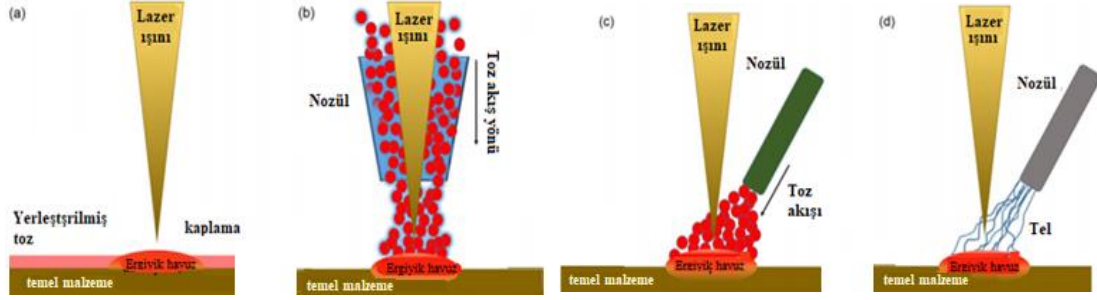
**Şekil 2:**

*Lazer kaplama prosesi (Zhu ve diğ., 2020) ve çalışma prensibi (Li ve diğ., 2020).*

Lazer kaplama işleminde üç durum büyük öneme sahiptir: ergiyik havuz, toz akış dinamikleri ve kaplama özellikleri. Kaynak havuzunda gerçekleşen hızlı katılma, güçlü sıvı konveksiyonu, yüzey gerilimi kaynaklı marangoni akışı (Jiang ve diğ., 2020), basınç değişimi kaynaklı sıçrama (spatter) etkisi (Prasad ve diğ., 2020) ve difüzyonlar gibi taşınım olayları kaplama tabakasının kompozisyonunu ve mikroyapısını belirler (Zhao ve diğ., 2020b). Ergimiş yüzey katılaştıktan sonra, istenen özelliklere sahip bir katman elde edilmiş olur (Shamsaei ve diğ., 2015); Zhao ve diğ., 2020b). Burada karmaşık olarak gelişen toz akış davranışı, nozul ile etkileşime giren lazer ve temel malzeme, ısı transferi ve kaynak havuzundaki olayların anlaşılması oldukça güçtür; dolayısıyla deneysel çalışmaların yanı sıra modelleme çalışmaları da yapılmıştır. Kaynak havuzu, toz akışı ve mikroyapı özelliklerini araştırmak için nümerik model oluşturularak simülasyonlar üzerinde çalışmalar yapılmıştır (Huang ve diğ., 2016; Zhang ve diğ., 2016).

Lazer kaplama prosesinde, kaplama malzemesinin beslenmesi farklı yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Beslenme yollarına bağlı olarak Şekil 3’de görüldüğü gibi dört tipte kategorize edilebilir: önceden yerleştirilmiş toz sistemi (Muvvala ve diğ., 2017), eşeksensiz toz sistemi (Devojno ve diğ., 2018), eksen dışı toz sistemi (Hofman ve diğ., 2011) ve tel besleme sistemi (Xu ve diğ., 2018). Şekil 3(a), önceden yerleştirilmiş toz sistemini göstermektedir; tozlar

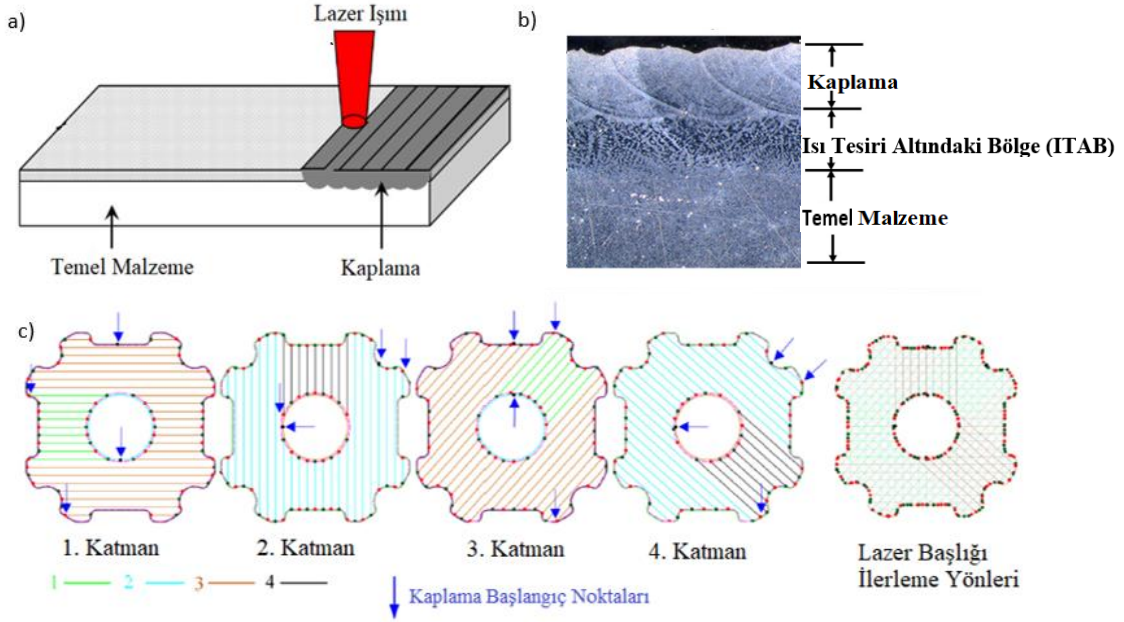
temel malzeme üzerine önceden yerleştirildikten sonra lazer ışını gönderilerek kaynak işlemi gerçekleştirilir. Şekil 3(b) 'de gösterildiği gibi lazer ışını ve toz besleme sistemi aynı eksenslidir (koaksiyal). Şekil 3(c), toz malzeme kaynak havuzuna lazer ışınının ekseninde bir nozul ile aktarılır. Şekil 3(d) tel besleme sisteminde toz malzeme yerine kaplama malzemesi olarak tel malzeme kullanılır. Toz partikülleri boyutları 50 ila 150 µm arasında değişir ve tel çapı 1 mm civarındadır (Tamanna ve diğ., 2019).



**Şekil 3:**

*Lazer dolgu kaynağı besleme yöntemleri (a) önceden yerleştirilmiş toz sistemi, (b) eşeksenli toz sistemi, (c) eksen dışı toz sistemi, (d) tel besleme sistemi (Tamanna ve diğ., 2019).*

Eşeksenli lazer kaplama işlemi, diğer üç besleme yöntemine göre kusursuz besleme sağladığı için öne çıkmaktadır, Şekil 4(a)'da şematik diyagram gösterilmektedir. Bu işlemde, toz besleyici ve lazer sisteminden oluşan eşeksenli nozul Y doğrultusunda hareket ederken Z doğrultusunda hareket etmektedir; kaynak işlemi yapılan temel malzeme sabit konumdadır (Ma ve diğ., 2020). Kaplama proseslerinde lazer kaplama bölgesi, ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) ve temel malzeme bölgeleri oluşmaktadır; Chew ve diğ. (2015) yapmış oldukları çalışmada bu bölgeler Şekil 4(b)'de gösterildiği üzere şematik olarak verilmiştir. Şematikte gösterilen her bölgenin özellikleri birbirinden farklıdır ve optik mikroskop incelemelerinde elde edilen görsellerde de bu bölgeler kolaylıkla ayırt edilebilmektedir. Katman sayısının birden fazla olduğu lazer kaplama işleminin yanısıra, her katmanın farklı yönlerde ve farklı geometrilerde olduğu uygulamalar da mevcuttur; dişli çark üzerine farklı geometrilerdeki uygulama Şekil 4(c)'de gösterilmektedir (Yu ve diğ., 2018).



**Şekil 4:**

(a) Eşeksenli lazer kaplama işleminin şematik diyagramı (Ma ve diğ., 2020), (b) kaplama bölgesi, ısı tesiri altındaki bölge ve temel malzeme şematik gösterimi (Chew ve diğ., 2015), (c) katmanların farklı yönlerde ve geometrilerde olduğu, dişli çark lazer kaplama uygulaması (Yu ve diğ., 2018).

### 3. LAZER KAPLAMA PROSES PARAMETRELERİ

Lazer kaplama teknolojisinde, lazer ışınının temel malzemeyi eritip kaynak havuzunun oluşması ve eriyiğin katılma sürecinde lazer gücü, ilerleme hızı ve toz besleme hızı parametreleri etkilidir. Değişken proses parametreleri kaplama geometrisini etkilemekte, malzemenin makroyapı, mikroyapı, çekme dayanımı, korozyon direnci ve yorulma dayanımı gibi mekanik özelliklerinde değişikliğe neden olmaktadır (Shamsaei ve diğ., 2015). Lazer kaplama işleminde hem proses parametreleri hem de malzeme karakteristikleri mekanik ve fiziksel özellikler üzerinde önemli etkilere sahiptir (El Cheikh ve diğ., 2012; Hemmati ve diğ., 2011; Shi ve diğ., 2018; Sun ve diğ., 2016).

#### 3.1. Proses Etkin Parametreleri: Lazer Gücü, İlerleme Hızı, Toz Besleme Hızı

Lazer gücü kaplama kalitesi üzerinde en önemli parametredir. Şimşek T. ve diğ. (2019) düşük lazer gücü ile yaptıkları deneylerde temel malzeme ile kaplama malzemesi arasında nüfuziyet gerçekleşmemiştir. Kaplama tabakasında yoğun çatlak ve gözenek problemlerinin varlığı tespit edilmiş; nanopartiküllerin yüzeylerde homojen olarak dağılmayıp topaklaşma oluşturduğu gözlemlenmiştir.

İlerleme hızı ve lazer gücü parametreleri oluşturdukları enerji girdisi sayesinde ergiyik havuzunun boyutunu belirleyerek kaplama kalitesi üzerinde etkide bulunmaktadır. Lazer gücünün artmasıyla enerji girdisi artmakta, lazer gücü artışı ile azalmaktadır (Eşitlik 1) (Moskal ve diğ., 2020). İlerleme hızının artışı etkileşim süresince kaynak havuzundaki ergimiş malzeme miktarında azalmaya yol açmaktadır.

$$\text{Enerji Girdisi}(J/mm^2) = \frac{\text{Lazer Gücü}(W)}{\text{İlerleme Hızı}(mm/s) * \text{Işın Çapı}(mm)} \quad (1)$$

Toz besleme hızı parametresi ise ısıdan etkilenen bölgenin boyutunu belirlemede hacimsel ısı girdisi üzerinde bir etkiye sahiptir. Yüksek toz besleme hızı ergime gerçekleşmeden toz malzemenin uzaklaşarak ergiyik havuzu kesitinin küçülmesine neden olmaktadır. Ergimemiş toz parçacıkları hızlı katılarak gazların hapsolmesiyle birlikte gözenekli bir yapı oluşumuna neden olmaktadır (Karşı, A. 2019).

Kaynak yapılabirlik, sıvı fazın yüzey gerilimi, termal iletkenlik, lazer ışınının yansıma ve soğurulması gibi malzeme özellikleri de lazer kaplama prosesini etkilemektedir (Cavaliere 2021). Ayrıca ilerleme yolunun değişmesi, kaynak havuzu sıcaklığı ve iş parçasının sıcaklık dağılımını etkileyerek mikroyapı ve kalıntı gerilme miktarını değiştirmektedir. Isı girdisinin yüksek olması malzemelerin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyerek kaplama tabakasında tane irileşmesine neden olmaktadır (Li ve diğ., 2019).

### 3.2. Lazer Kaplama Geometrisi

Yapılan bazı çalışmalara göre lazer gücü, toz debisi, ilerleme hızı, odak mesafesi kaplamanın kalitesi üzerinde büyük etkileri olmuştur. Chen ve diğ., (2019) ve benzer araştırmalarda bulunan Cheikh ve diğ. (2012); lazer gücü, ilerleme hızı ve besleme hızı parametreleri ile kaynak genişliği, kaynak yüksekliği, kaynak alanı ve penetrasyon derinliği arasındaki ilişkileri araştırmışlardır. Çalışmalarında lazer gücü ve besleme hızının artmasının ve ilerleme hızının düşmesinin kaplama kalınlığını artırdığını gözlemlemişlerdir.

Kattire ve diğ. (2015) yapmış oldukları çalışmada, kalıp onarım uygulamaları için bir takım çeliği üzerine bir çelik tozu lazer kaplamasının deneysel karakterizasyonunu araştırmış; lazer parametrelerinin kaplama geometrisi ve kaplama kalitesi üzerindeki etkisini ortaya koymuşlardır. Çalışmalarında lazer gücü ve ilerleme hızı, enerji girdisi ile ilgili önemli parametrelerdir; toz akış hızı, lazer ışınının yayılma etkisi nedeniyle önemli olmuştur. Kaplama yüksekliği, lazer kaynağının ilerleme hızındaki artışı ile azalma göstermiştir. Toz besleme hızı düşük olduğunda da kaplama yüksekliği nispeten azdır; temel malzemenin önemli ölçüde erimesi nedeniyle yapışma yüksektir. Toz akış hızı arttıkça, birim uzunluk başına sağlanan artan toz hacmi nedeniyle daha kalın bir kaplamanın oluştuğunu açıklamışlardır (Kattire ve diğ., 2015).

Lazer kaplama işleminde katman sayısı, kaynak genişliği ve kaynak yüksekliğini değiştirdiğinden parçanın hassasiyetini etkilemektedir. Katmanlı olarak biriken malzemenin hassasiyetini arttırmak için Gao J. ve diğ. (2020) parçaların kesit boyutları üzerindeki etki faktörleri hakkında çalışmalarda bulunarak optimum proses parametrelerini araştırmışlardır. Lazer kaplama işlemi sırasında, kaplama alanındaki sıcaklığın kontrol edilmesi de önem arz etmiştir.

### 3.3. Proses Parametre Optimizasyonu

Proses parametrelerinin optimizasyonu ile nitelikli istenen yapı ve malzemelerin araştırılmasına yönelik birçok çalışma (Chen ve diğ., 2019; Li ve diğ., 2019; Reddy ve diğ., 2018; Shamsaei ve diğ., 2015) yapılmıştır.

Lazer kaplama işleminde, çeşitli deneysel - istatistiksel, analitik ve sayısal modeller oluşturulabilmektedir. Bu modeller, esas olarak eklemeli imalatın doğrudan enerji biriktirme işlemlerinden olan lazer kaplama ile uygulanabilen kaplama geometrilerini, kaplama özelliklerini, toz akış debisini ve termal profili tahmin etmek için kullanılmaktadır (Zareh ve Urbanic, 2020). Bu modeller için kullanılan yöntem, işlem parametreleri ve elde edilen sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir (Farahmand ve diğ., 2014; Huang ve diğ., 2016).

**Tablo1. Eklemeli imalat yönteminde lazer kaplama ile mevcut uygulanabilen modellerde, uygulama metodu, proses parametreleri ve ölçülebilecek çıktıların şematik gösterimi (Farahmand ve diğ., 2014; Huang ve diğ., 2016).**

Yöntem	Optimizasyon Yöntemi	Proses Parametreleri	Çıktılar
Deneysel İstatistiksel Modelleme	Response Surface Metod	Lazer ışını	Kaplama yüksekliği
	ANOVA	Toz besleme	Kaplama genişliği
Sayısal Modelleme	Taguchi	İlerleme hızı	Kaynak havuzu derinliği
	CFD	Lazer Işını	Kaplama yüksekliği
	FEM	Toz besleme	Kaplama genişliği
	FDM	İlerleme hızı	Kaynak havuzu derinliği
			Toz akış şekli
			Parçacık hızı
			Sıcaklık dağılımı
			Kalıntı gerilme analizi

Malzeme yapısının geometrik özellikleri dolayısıyla lazer kaplama proses parametreleri optimize edilmelidir; girinti ve çıkıntılarının çok olduğu doğrusal olmayan yüzeylerde yüksek kalitede kaplama elde edebilmek için proses parametrelerinin optimum kombinasyonu belirlenmelidir (Marzban ve diğ., 2014). Proses parametrelerini optimize edebilmek için birçok çalışma yapılmıştır (Calleja ve diğ., 2014; Marzban ve diğ., 2014).

Mondal ve diğ. (2013) Taguchi deney tasarımında ortogonal L9 dizisini kullanarak AISI 1040 çeliklerde farklı işlem parametreleri ile çalışmışlardır. Çalışma sonucunda, çoktan aza doğru lazer gücü, ilerleme hızı ve besleme hızlarının kaplama özellikleri kalitesi üzerinde etkili olduğunu bulmuşlardır. Marzban ve diğ. (2014) AISI 1040 çeliklerde kaplama yüksekliği, kaplama genişliği ve kaplama derinliği üzerinde proses faktörlerinin etkisini araştırmışlardır. L9 ortogonal dizisine göre deney tasarımı yapılmış ve temel bileşen analizi kullanılarak lazer kaplama işleminin çoklu yanıt optimizasyonu için TOPSIS yöntemiyle entegre edilmiştir. Sonuçlar, lazer gücünün lazer kaplama kalitesi özellikleri üzerinde en büyük etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Davim ve diğ. (2006) istatistiksel analiz kullanarak Ni bazlı kaplamanın geometrik formu ve sertliği üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır: lazer gücünün penetrasyon derinliği (% 77.9) ve kaplama sertliği (% 62.1) üzerinde istatistiksel ve fiziksel etki gösteren işlem parametresi olduğunu tespit etmişlerdir.

#### 4. SONUÇLAR

Lazer kaplama eklemeli imalat yöntemi prototip, imalat ve hasarlı bölgenin onarımı konularında lider bir teknolojidir. Genellikle yüksek maliyete sahip kalıpların onarımında kullanılmak üzere; gövde bileşenleri, medikal implant, türbin kanadı, otomotiv çelikleri, takım çelikleri, motor krank mili, demiryolu tekerleri, dişli çarklar vb. uygulamaları da bulunmaktadır. Malzeme yüzeyinde diğer geleneksel metodlara göre üstün metalurjik özelliklere sahiptir: yorulma dayanımı, korozyon direnci, çekme dayanımı gibi mekanik özellikler istenilen düzeylerde elde edilebilmektedir.

Kaplama kalitesini etkileyen proses parametreleri etki derecesinin büyüklüğüne göre: lazer gücü, ilerleme hızı ve toz besleme hızıdır. Lazer gücündeki artış ile toz malzeme verimi ve kaplama kalınlığı artmakta; ilerleme hızındaki artış ile toz verimi düşmekte ve kaplama kalınlığı azalmaktadır. Düşük enerji girdisi gözenek oluşumuna neden olmaktadır; porozite ve çatlak

oluşumu istenmeyen durumlardır. Malzemede istenilen mikroyapı ve mekanik özellikleri elde edebilmek için genellikle optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır.

Lazer kaplama işlemi sırasında kaynak havuzunda hızlı katılaşma, güçlü sıvı konveksiyonu, yüzey gerilimi kaynaklı marangoni akışı, basınç değişikliği kaynaklı sıçrama etkisi ve difüzyon olayları gibi karmaşık taşınım olayları gerçekleşmektedir. Kaplama tabakasının mikroyapı özellikleri de doğrudan bu olaylar ile ilişkili olmaktadır.

Kaynak bölgesindeki sıcaklığın kontrol edilmesi önem arz etmektedir; sıcaklık alanının değişimi ile mikroyapıda tane boyutları irileşmekte ve kalıntı gerilmelere neden olarak deformasyona neden olmakta, malzemenin mekanik özelliklerini değiştirmektedir.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI

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

## YAZAR KATKISI

Hakan AYDIN ve Çiğdem DİNDAR, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, Çiğdem DİNDAR ve Meryem ALTAY ayrıca veri toplama aşamalarında katkı sağlamışlardır. Tüm yazarlar; çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin yönetiminde, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması ve fiziksel içeriğin incelenmesi kısımlarına katkı sağlamış olup çalışmanın son onay ve tam sorumluluğunu üstlenmektedirler.

## KAYNAKLAR

1. Al-Hamdani, K. S., Murray, J. W., Hussain, T., Clare, A. T. (2020) Controlling ceramic-reinforcement distribution in laser cladding of MMCs, *Surface and Coatings Technology*, 381, 125128. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125128>.
2. Barr, C., Da, S., Easton, M., Orchowski, N., Matthews, N. (2018) Influence of macrosegregation on solidification cracking in laser clad ultra-high strength steels, *Surface & Coatings Technology*, 340, 126–136. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.02.052>
3. Bartkowski, D., Młynarczak, A., Piasecki, A., Dudziak, B., Gościański, M., Bartkowska, A. (2015) Microstructure, microhardness and corrosion resistance of Stellite-6 coatings reinforced with WC particles using laser cladding, *Optics and Laser Technology*, 68, 191–201. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2014.12.005>
4. Bu, R., Jin, A., Sun, Q., Zan, W., He, R. (2020) Study on laser cladding and properties of AZ63-Er alloy for automobile engine, *Journal of Materials Research and Technology*, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.03.032>
5. Calleja, A., Tabernero, I., Fernández, A., Celaya, A., Lamikiz, A., López De Lacalle, L. N. (2014) Improvement of strategies and parameters for multi-axis laser cladding operations, *Optics and Lasers in Engineering*, 56, 113-120. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.12.017>
6. Cavaliere, P. (2021) *Laser Cladding of Metals*, Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-53195-9>
7. Chen, C., Wang, Y., Ou, H., He, Y., Tang, X. (2014) A review on remanufacture of dies and moulds, *Journal of Cleaner Production*, 64, 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.014>



8. Chen, H., Lu, Y., Sun, Y., Wei, Y., Wang, X., Liu, D. (2020) Coarse TiC particles reinforced H13 steel matrix composites produced by laser cladding, *Surface and Coatings Technology*, 125867. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125867>
9. Chen, J., Wang, S. H., Xue, L. (2012) On the development of microstructures and residual stresses during laser cladding and post-heat treatments, *Journal of Materials Science*, 47(2), 779–792. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5854-4>
10. Chen, T., Wu, W., Li, W., Liu, D. (2019) Laser cladding of nanoparticle TiC ceramic powder: Effects of process parameters on the quality characteristics of the coatings and its prediction model, *Optics and Laser Technology*, 116, 345–355. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.03.048>
11. Chew, Y., Pang, J. H. L., Bi, G., & Song, B. (2015). Thermo-mechanical model for simulating laser cladding induced residual stresses with single and multiple clad beads. *Journal of Materials Processing Technology*, 224, 89–101. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.04.031>
12. Davim, J. P., Oliveira, C., Cardoso, A. (2006) Laser cladding: An experimental study of geometric form and hardness of coating using statistical analysis, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220(9), 1549–1554. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM641>
13. Devojno, O. G., Feldshtein, E., Kardapolava, M. A., Lutsko, N. I. (2018) On the formation features, microstructure and microhardness of single laser tracks formed by laser cladding of a NiCrBSi self-fluxing alloy, *Optics and Lasers in Engineering*, 106, 32–38. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.02.004>
14. El Cheikh, H., Courant, B., Branchu, S., Hascoët, J.-Y., Guillén, R. (2012) Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process, *Optics and Lasers in Engineering*, 50(3), 413–422. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2011.10.014>
15. Farahmand, P., Kovacevic, R. (2014) An experimental-numerical investigation of heat distribution and stress field in single- and multi-track laser cladding by a high-power direct diode laser, *Optics and Laser Technology*, 63, 154–168. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2014.04.016>
16. Fu, Y., Guo, N., Cheng, Q., Zhang, D., Feng, J. (2020) In-situ formation of laser-cladded layer on Ti-6Al-4 V titanium alloy in underwater environment, *Optics and Lasers in Engineering*, 131(2). <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106104>
17. Gao, J., Wu, C., Hao, Y., Xu, X., Guo, L. (2020) Numerical simulation and experimental investigation on three-dimensional modelling of single-track geometry and temperature evolution by laser cladding, *Optics and Laser Technology*, 129, 106287. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106287>
18. Hemmati, I., Ocelík, V., De Hosson, J. T. M. (2011) The effect of cladding speed on phase constitution and properties of AISI 431 stainless steel laser deposited coatings, *Surface and Coatings Technology*, 205(21–22), 5235–5239. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.05.035>
19. Hofman, J. T., de Lange, D. F., Pathiraj, B., Meijer, J. (2011) FEM modeling and experimental verification for dilution control in laser cladding, *Journal of Materials Processing Technology*, 211(2), 187–196. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.09.007>

20. Huang, L., Zhou, J., Xu, J., Huo, K., He, W., Meng, X., Huang, S. (2020) Microstructure and wear resistance of electromagnetic field assisted multi-layer laser clad Fe901 coating, *Surface and Coatings Technology*, 125876. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125876>
21. Huang, Y., Khamesee, M. B., Toyserkani, E. (2016) A comprehensive analytical model for laser powder-fed additive manufacturing, *Additive Manufacturing*, 12, 90–99. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.07.001>
22. Jiang, Y., Cheng, Y., Zhang, X., Yang, J., Yang, X. (2020) Optik Simulation and experimental investigations on the effect of Marangoni convection on thermal field during laser cladding process, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 203, 164044. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.164044>
23. Kaierle, S., Overmeyer, L., Alfred, I., Rottwinkel, B., Hermsdorf, J., Wesling, V., Weidlich, N. (2017) CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology Single-crystal turbine blade tip repair by laser cladding and remelting, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 19, 196–199. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.04.001>
24. Karşı, A. (2019). Otomotivde lazer dolgu kaynağı parametrelerinin etkilerinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
25. Kattire, P., Paul, S., Singh, R., Yan, W. (2015) Experimental characterization of laser cladding of CPM 9V on H13 tool steel for die repair applications, *Journal of Manufacturing Processes*, 20, 492–499. <https://doi.org/10.1016/j.jmpro.2015.06.018>
26. Li-Yan, L., Yu, Z., Yun-Jie, J., Yan, L., Hong-Fang, T., Yu-Jun, C., Cheng-Xin, L. (2020) High speed laser clad Ti-Cu-NiCoCrAlTaY burn resistant coating and its oxidation behavior, *Surface and Coatings Technology*, 392, 125697. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125697>
27. Li, C., Sun, S., Zhang, Y., Liu, C., Deng, P., Zeng, M., Wang, F., Ma, P., Li, W., Wang, Y. (2019) Effects of laser processing parameters on microstructure and mechanical properties of additively manufactured AlSi10Mg alloys reinforced by TiC, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(5–8), 3235–3246. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04001-9>
28. Li, X., Li, T., Shi, B., Wang, D., Adnan, M., Lu, H. (2020) The influence of substrate tilt angle on the morphology of laser cladding layer, *Surface and Coatings Technology*, 391, 125706. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125706>
29. Liu, H., Hu, Z., Qin, X., Wang, Y., Zhang, J. (2017) Parameter optimization and experimental study of the sprocket repairing using laser cladding, *Int J Adv Manuf Technology*, 91:3967–3975. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0066-y>
30. Liu, J., Yu, H., Chen, C., Weng, F., Dai, J. (2017) Research and development status of laser cladding on magnesium alloys: A review, *Optics and Lasers in Engineering*, 93, 195–210. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2017.02.007>
31. Locs, S., Boiko, I., Leitans, A., Drozdovs, P. (2017) Experimental study of coaxial laser cladding of tool steel, *Engineering for Rural Development*, 16, 1038–1046. <https://doi.org/10.22616/ERDev2017.16.N219>
32. Lourenço, J. M., Sun, S. Da, Sharp, K., Luzin, V., Klein, A. N., Wang, C. H., Brandt, M. (2016) Fatigue and fracture behavior of laser clad repair of AerMet® 100 ultra-high strength steel, *International Journal of Fatigue*, 85, 18–30. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.11.021>

33. Lu, J. Z., Cao, J., Lu, H. F., Zhang, L. Y., Luo, K. Y. (2019) Wear properties and microstructural analyses of Fe-based coatings with various WC contents on H13 die steel by laser cladding, *Surface & Coatings Technology*, 369, 228–237. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.063>
34. Ma, M., Xiong, W., Lian, Y., Han, D., Zhao, C., Zhang, J. (2020) Modeling and optimization for laser cladding via multi-objective quantum-behaved particle swarm optimization algorithm, *Surface and Coatings Technology*, 381, 125129. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125129>
35. Marin, E., Zanocco, M., Boschetto, F., Santini, M., Zhu, W., Adachi, T., Ohgitani, E., McEntire, B. J., Bal, B. S., Pezzotti, G. (2020) Silicon nitride laser cladding: A feasible technique to improve the biological response of zirconia, *Materials & Design*, 191, 108649. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108649>
36. Marques, M. J., Ramasamy, A., Batista, A. C., Nobre, J. P., Loureiro, A. (2015) Effect of heat treatment on microstructure and residual stress fields of a weld multilayer austenitic steel clad, *Journal of Materials Processing Technology*, 222, 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.03.004>
37. Marzban, J., Ghaseminejad, P., Ahmadzadeh, M. H., Teimouri, R. (2014) Experimental investigation and statistical optimization of laser surface cladding parameters, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(5–8), 1163–1172. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6338-x>
38. Mondal, S., Paul, C. P., Kukreja, L. M., Bandyopadhyay, A., Pal, P. K. (2013) Application of Taguchi-based gray relational analysis for evaluating the optimal laser cladding parameters for AISI1040 steel plane surface, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(1–4), 91–96. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4308-8>
39. Moskal, G., Niemiec, D., Chmiela, B., Kałamarz, P., Durejko, T., Ziętała, M., Czujko, T. (2020) Microstructural characterization of laser-cladded NiCrAlY coatings on Inconel 625 Ni-based superalloy and 316L stainless steel, *Surface and Coatings Technology*, 387, 125317. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125317>
40. Muvvala, G., Patra Karmakar, D., Nath, A. K. (2017) Online monitoring of thermo-cycles and its correlation with microstructure in laser cladding of nickel based super alloy, *Optics and Lasers in Engineering*, 88, 139–152. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.08.005>
41. Quazi, M. M., Fazal, M. A., Haseeb, A. S. M. A., Yusof, F., Masjuki, H. H., Arslan, A. (2016) Effect of rare earth elements and their oxides on tribo-mechanical performance of laser claddings: A review, *Journal of Rare Earths*, 34(6), 549–564. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(16\)60061-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(16)60061-3)
42. Reddy, L., Preston, S. P., Shipway, P. H., Davis, C., Hussain, T. (2018) Process parameter optimisation of laser clad iron based alloy: Predictive models of deposition efficiency, porosity and dilution, *Surface and Coatings Technology*, 349, 198–207. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.05.054>
43. Ren, H., Ren, J., Zhao, L., Wang, Q. (2013) Simulation Analysis on Selection of Laser Cladding Repair Material for the Diesel Engine Crankshaft Crack, *Advanced Materials Research*, 820, 175–179. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.820.175>
44. Riveiro, A., Mejías, A., Lusquiños, F., del Val, J., Comesaña, R., Pardo, J., Pou, J. (2014) Laser cladding of aluminium on AISI 304 stainless steel with high-power diode lasers,

- Surface and Coatings Technology*, 253, 214–220. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.05.039>
45. Roy, T., Paradowska, A., Abrahams, R., Law, M., Mutton, P., Soodi, M., Yan, W. (2020) Residual stress in laser clad heavy-haul rails investigated by neutron diffraction, *Journal of Materials Processing Technology*, 278, 116511. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116511>
46. Singh, S., Ramakrishna, S., Singh, R. (2017) Material issues in additive manufacturing A review, *Journal of Manufacturing Processes*, 25, 185–200. doi:10.1016/j.jmapro.2016.11.006
47. Shamsaei, N., Yadollahi, A., Bian, L., Thompson, S. M. (2015) An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control, *Additive Manufacturing*, 8, 12–35. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.07.002>
48. Shi, J., Zhu, P., Fu, G., Shi, S. (2018) Geometry characteristics modeling and process optimization in coaxial laser inside wire cladding, *Optics & Laser Technology*, 101, 341–348. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.10.035>
49. Shi, Y., Jin, H., Wu, P. D., Lloyd, D. J. (2017) Acta Materialia Analysis of roping in an AA6111 T4P automotive sheet in 3D deformation states, *Acta Materialia*, 124, 598–607. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.11.028>
50. Şimşek, T., İzçiler, M., Özcan, Ş., Akkurt, A. (2019) Laser Cladding of Hot Work Tool Steel (H13) With Nano Tic Particles, *Turkish Journal of Engineering*, 3(1), 1–10. <https://doi.org/10.31127/tuje.419531>
51. Siva Prasad, H., Brueckner, F., Volpp, J., Kaplan, A. F. H. (2020) Laser metal deposition of copper on diverse metals using green laser sources, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(3–4), 1559–1568. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05117-z>
52. Sun, G., Tong, Z., Fang, X., Liu, X., Ni, Z., Zhang, W. (2016) Effect of scanning speeds on microstructure and wear behavior of laser-processed NiCr–Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>–MoS<sub>2</sub>–CeO<sub>2</sub> on 38CrMoAl steel, *Optics & Laser Technology*, 77, 80–90. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.08.008>
53. Taberero, I., Lamikiz, A., Ukar, E., Arregi, B., Figueras, J., Soriano, C. (2009) Parameter optimization for mould and die recovering using laser cladding, *AIP Conference Proceedings*, 1181, 484–493. <https://doi.org/10.1063/1.3273666>
54. Tamanna, N., Crouch, R., Naher, S. (2019) Progress in numerical simulation of the laser cladding process, *Optics and Lasers in Engineering*, 122, 151–163. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.05.026>
55. Theron, M., Rooyen, C. Van, Malabi, K. (2020) *Investigation into laser refurbishment and transformation hardening of cast iron forming dies for the automotive industry Investigation into laser refurbishment and transformation hardening of cast iron forming dies for the automotive industry*, 022071. <https://doi.org/10.2351/7.0000106>
56. Toyserkani, E., Khajepour, A., Corbin, S. (2004) *Laser Cladding*, CRC Press, New York. <https://doi.org/10.1201/9781420039177>
57. Wang, Q., Chen, F. Q., Zhang, L., Li, J. D., Zhang, J. W. (2020) Microstructure evolution and high temperature corrosion behavior of FeCrBSi coatings prepared by laser cladding, *Ceramics International*, 46, 17233–17242. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.04.010>

58. Weng, F., Chen, C., Yu, H. (2014) Research status of laser cladding on titanium and its alloys: A review, *Journal of Materials&Design*, 58, 412–425. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.077>
59. Xu, X., Mi, G., Xiong, L., Jiang, P., Shao, X., Wang, C. (2018) Morphologies, microstructures and properties of TiC particle reinforced Inconel 625 coatings obtained by laser cladding with wire, *Journal of Alloys and Compounds*, 740, 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.298>
60. Yu, J., Rombouts, M., Maes, G. (2013) Cracking behavior and mechanical properties of austenitic stainless steel parts produced by laser metal deposition, *Materials and Design*, 45, 228–235. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.078>
61. Yu, T., Zhao, Y., Sun, J., Chen, Y., Qu, W. (2018) Process parameters optimization and mechanical properties of forming parts by direct laser fabrication of YCF101 alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 262, 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.06.023>
62. Zareh, P., Urbanic, R. J. (2020) Numerical simulations for laser clad beads with a variable side-to-side overlap condition, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1027–1058. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05565-7>
63. Zhan, X., Qi, C., Gao, Z., Tian, D., Wang, Z. (2019) The influence of heat input on microstructure and porosity during laser cladding of Invar alloy, *Optics and Laser Technology*, 113, 453–461. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.01.015>
64. Zhang, Z., Farahmand, P., Kovacevic, R. (2016) Laser cladding of 420 stainless steel with molybdenum on mild steel A36 by a high power direct diode laser, *Materials & Design*, 109, 686–699. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.114>
65. Zhao, J., Wang, G., Wang, X., Luo, S., Wang, L., Rong, Y. (2020a) Multicomponent multiphase modeling of dissimilar laser cladding process with high-speed steel on medium carbon steel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 148, 118990. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118990>
66. Zhao, Y., Yu, T., Sun, J., Jiang, S. (2020b) Microstructure and properties of laser clad B4C/TiC/Ni-based composite coating, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 86, 105112. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.105112>
67. Zheng, M., Fan, D., Li, X. K., Li, W. F., Liu, Q. B., Zhang, J. B. (2008) Microstructure and osteoblast response of gradient bioceramic coating on titanium alloy fabricated by laser cladding, *Applied Surface Science*, 255(2), 426–428. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.06.078>
68. Zhu, L., Wang, S., Pan, H., Yuan, C., Chen, X. (2020) Research on remanufacturing strategy for 45 steel gear using H13 steel powder based on laser cladding technology, *Journal of Manufacturing Processes*, 49, 344–354. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.12.009>
69. Zhu, Y., Yang, Y., Mu, X., Wang, W., Yao, Z., Yang, H. (2019) Study on wear and RCF performance of repaired damage railway wheels: Assessing laser cladding to repair local defects on wheels, *Wear*, 431, 126–136. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.04.028>

