

Eklemeli İmalat Yöntemi ile Üretilmiş Alüminyum Alaşımlarının Malzeme Yapısal Parametrelerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Derleme

Murat AKTÜRK¹, Mehmet Erdi KORKMAZ^{1,*}

¹Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Karabük, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 09.03.2021

Kabul: 19.04.2021

Anahtar Kelimeler:

Eklemeli İmalat
Alüminyum alaşımı
Malzeme yapısal
parametreleri
Johnson-Cook

ÖZET

Eklemeli İmalat Teknolojileri (Eİ), seramik, plastik, metal alaşımları ve kompozitler gibi üretim alanlarında yaygın kullanılan malzemelerin yanı sıra hamur, alçı, çikolata ve beton gibi özel materyallerin de üretimde kullanılabilmesinin önünü açmaktadır. Ancak günümüz üretimlerinin büyük çoğunluğu ham madde olarak hala metalleri ve metal alaşımlarını kullanmaktadır. Alüminyum alaşımları ise metal üretim ham maddeleri içerisinde büyük öneme sahiptir. Alüminyum alaşımları, ucuz, termal iletkenlikleri yüksek ve hafif malzemeler oldukları için uzay, havacılık, ev aletleri ve otomotiv gibi günlük yaşantımızda sıklıkla karşılaştığımız bir malzemedir. Diğer birçok üretim materyalinde de olduğu gibi alüminyum içeren malzemeler de üretim aşamaları sırasında plastik deformasyona uğramaktadır. Malzemede oluşacak bu plastik deformasyon miktarı ve malzemeye uygulanacak etkilere karşı malzemenin göstereceği davranışların üretim öncesinde biliniyor olması üretimin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi açısından öneme sahiptir. Malzemenin plastik deformasyona uğradığı süre zarfında kullanılan işleme parametreleri, deney çalışmaları ve/veya sonlu elemanlar yöntemini baz alan bilgisayar programlarında gerçekleştirilen simülasyonlar ile optimize edilebilmektedir. Deneysel çalışmalarla kıyaslandığında simülasyonlar, düşük maliyetli ve kısa sürede gerçekleştirilebilen işlemler olması nedeniyle daha fazla avantaja sahiptir. Ancak, uygulanabilirliği yüksek tutarlı sonuçların bulunabilmesi için üretim malzemesi modeline ait parametrelerin doğru belirlenmiş olması gerekmektedir. Kullanılan parametrelerin doğruluk seviyesi simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlara olan benzerliğiyle doğru orantılıdır. Bu derleme çalışmasında, Eİ uygulamalarında kullanılan alüminyum alaşımlarına ait malzeme yapısal parametreleriyle ilgili güncel bilgiler verilmiştir.

A Review on Determination of Material Constitutive Parameters of Aluminum Alloys Produced by Additive Manufacturing Method

ARTICLE INFO

Received: 09.03.2021

Accepted: 19.04.2021

Keywords:

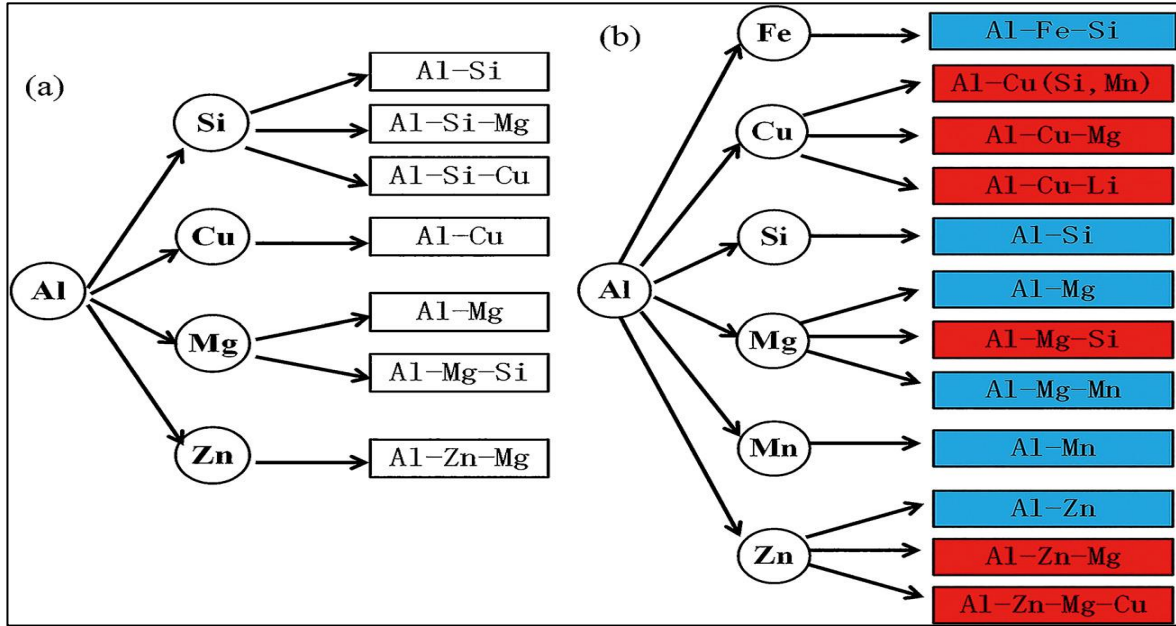
Additive Manufacturing
Aluminum alloys
Material constitutive
parameters
Johnson-Cook

ABSTRACT

Additive Manufacturing (AM) Technologies give the way for the production of special materials such as dough, gypsum, chocolate and concrete as well as materials commonly used in production areas such as ceramics, plastics, metal alloys and composites. However, the majority of today's production still uses metals and metal alloys as raw materials. Aluminum alloys are of great importance in metal production raw materials. Since aluminum alloys are cheap, high thermal conductivity and light materials, they are frequently encountered in our daily lives such as space, aviation, home appliances and automotive. As with many other production materials, aluminum-containing materials also undergo plastic deformation during the production stages. Knowing the amount of plastic deformation that will occur in the material and the behavior of the material against the effects to be applied to the material before production is important for a healthy production. The processing parameters used during the period of plastic deformation of the material can be optimized by experiments and / or simulations performed in computer programs based on the finite element method. Compared to experimental studies, simulations have more advantages because they are low cost and can be performed in a short time. However, in order to find consistent results with high applicability, the parameters of the production material model must be determined correctly. The accuracy of the parameters used is directly proportional to the similarity of the simulation results to the experimental results. In this review, up-to-date information on material structural parameters of aluminum alloys used in AM applications is given.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alüminyum üretim endüstrisi 100 yıldan aşkın süredir üretimde yerini bulmaktadır ve ayrıca yüksek kaynaklanabilir özelliği ve yüksek mukavemet / ağırlık oranı nedeniyle daha geniş uygulama alanı bulmaktadır. Hafiflik, dayanıklılık, şekillendirilebilirlik, kaynaklanabilirlik, iletkenlik ve bitirilebilirlik gibi temel avantajları onu diğer metallere göre popüler kılmaktadır. Sürekli araştırma ve geliştirme, neredeyse sonsuz uygulama yelpazesinde alüminyum kullanımına yol açmıştır. [1,2]. Alüminyum alaşımının çöktürme sertleştirilmesi ile ısıl işleme yanıt verip vermediğine göre, alüminyum alaşımları ayrıca Şekil 2.1'de gösterildiği gibi ısıl işlem görebilen ve ısıl işlem göremeyen alüminyum alaşımları olarak da ayrılabilir [3].



Şekil 1. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması: (a) döküm alaşımları. (b) işlenmiş alaşımları. Isıl işlem göremeyen alüminyum alaşımları mavi, ısıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımları kırmızı renktedir (Classification of aluminum alloys: (a) casting alloys. (b) wrought alloys. Aluminum alloys that cannot be heat-treated are blue, aluminum alloys that can be heat-treated are red) [4].

Bu konu hakkında, Romanova ve ark. [5] katmanlı olarak üretilen alüminyum alaşımlarının deformasyon yanıtını simüle etmek için hesaplamalı bir yaklaşım sunmuşlardır. Seçici lazer eritme ile üretilen alüminyum alaşımları için tipik olan tane geometrisine sahip üç boyutlu bir mikro yapı, adım adım paketleme yöntemi ile oluşturulmuştur. Tane davranışı, kayma sistemlerinin açık bir şekilde dikkate alınmasıyla kristal plastisite açısından tanımlanmıştır. Tanecik hücresel-dendritik altyapısı, tane sınırı güçlendirmesi ve gerinim sertleşmesini hesaba katarak kritik çözülmüş kayma gerilimini açıklamak için fenomenolojik bir denklem kullanılmıştır. Mikroyapı temelli kurucu model, yarı statik gerilim simülasyonlarında kullanılmıştır. Hesaplama maliyetlerini azaltmak için, yarı statik yükleme, doğrusal olmayan problemleri çözmek için yüksek sayısal verimlilik sağlayan açık bir zaman entegrasyon şeması kullanılarak dinamikler açısından simüle edilmiştir. Mikromekanik simülasyonlardan nelerin elde edilebileceğini göstermek için, üç farklı yön boyunca gerilmeye ve kesmeye tabi tutulan ilave olarak üretilmiş alüminyum alaşımının bir polikristalin modeli için hesaplama sonuçlarını sunmuşlardır. Diğer ayrıntılı çalışmalar sonraki bölümlerde verilmiştir.

Bu çalışmada, Eİ endüstrisinde yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımlarının malzeme yapısal parametrelerinin belirlenmesi hakkında güncel bilgiler verilmiştir.

2. EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİ (ADDITIVE MANUFACTURING METHODS)

Parçaların yeniden tasarımıyla birleştirilen metal parçaların eklemeli imalatla (Eİ) üretilmesi parçaların üretim maliyetleri üzerinde tasarruf edilebilmesini sağlamaktadır. Yani Eİ yöntemleri kullanılarak üretilmeyecek bileşenler Eİ ile üretilebilecek şekilde değiştirilerek zaman ve maliyet tasarrufu sağlamaktadır [6].

1990'ların başından itibaren başlayan ve her geçen gün gelişen hızlı prototipleme tekniklerinde yaygın olarak kullanılan Eİ teknolojileri, bilgisayar destekli çizim (CAD) modellerine ait verilerin fiziksel nesneye dönüştürülmesini sağlayarak üretim adımlarını minimize etmektedir. Günümüzde polimerler, metaller, seramikler veya diğer özel kullanımlara sahip spesifik malzemeler gibi çok çeşitli malzemelerin kavramsal ve işlevsel prototiplerin imalatında kullanımları oldukça yaygındır [7]. Ayrıca malzemelerin katmanlar halinde birbirlerine eklenmesiyle gerçekleştirilen üretimler, sadece konsept tasarımların veya montaj testi uygulamalarında değil nihai yekpare metal ürünlerin üretimlerinde de kullanılmaktadır [8].

İngiliz The Economist dergisi, 2001 yılında eklemeli imalat teknolojilerinin üretim yapan şirketlerin ekonomilerinde oluşturacağı etkileri öngörerek bu yöntemlerin gelecekte işletmelerin çalışma şekilleri ve karlılıklarında derin bir etki yaratacağını belirtmiştir [9]. Ardından 2002 yılında birkaç araştırma grubu Eİ teknolojilerinin, ticari uçak endüstrisi için yedek parça üretimi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Araştırmalar, parçaların Eİ ile üretilerek firmaların yedek parçaları fazla sayıda stoklamalarından ötürü oluşan maliyetleri azaltabileceklerini göstermiştir [10].

Öte yandan Eİ teknolojilerindeki gelişmelerin halihazırda kullanılmakta olan geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla ne denli rekabetçi olabileceğine dair oluşan soru işaretleri, araştırmacıları bu yönde araştırmalar yapmaya yöneltmiştir. Örneğin, Hızlı Prototipleme Raporu [11] Hopkinson-Dickens [12] ve Griffiths [13] yaptıkları çalışmalarda plastik parçaların Eİ ile üretiminin ekonomik faydalarını analiz ederek küçük ve orta boyutlu parçaların katmanlı imalat ile üretilmelerinin daha ekonomik olduğunu belirtmişlerdir. Ancak daha yüksek verim ve kar sağlanabilmesi için geleneksel üretimden Eİ'ye geçiş aşamasında parçalar yeniden tasarlanarak üretim için uygun hale getirilmelidir. Öte yandan, geometrik kısıtlamaların olmaması ve karmaşık yapıların üretilmesi, tasarım çalışmalarının parçanın işlevselliğine ve montajına yönelebilmeye imkan sağlamaktadır [6].

3D baskı olarak da bilinen eklemeli imalat (Eİ), sahip olduğu rekabetçi üretim maliyetleri ve üretim sürelerinin yanı sıra plastikten seramiğe ve metallere kadar çeşitli malzemelerin özelleştirilmiş bileşenlerinin üretilmesini sağladığı için günümüzdeki popüler üretim yöntemlerinin başında gelmektedir [14]. Özellikle metal malzemeler kullanılarak karmaşık bileşenlerin oluşturulabilmesini sağlaması nedeniyle Eİ'ye olan ilgi her geçen gün artmaktadır [15]. Lazer veya elektron ışını kullanan Eİ makineleri günümüzde yedek parça üretiminde kullanılmakta ve geleneksel dövme, frezeleme ve döküm üretim yöntemleriyle kıyaslandığında rakipsizdir. Buna en iyi örnek biyokompozit destek yapıları gösterilebilir.

Eİ teknolojileri, geniş bir yelpazede ve birbirlerinden oldukça farklı ürünlerin üretimine imkân sağlayan sistemlerdir. Bu teknolojiler imalatla kullanılan malzeme çeşidine ve işlem süreçlerine bağlı olarak birbirlerinden ayrılmaktadırlar. Endüstride yaygın olarak kullanılan eklemeli imalat yöntemleri ve bu yöntemlerin kısa tanımları Tablo 1'de gösterilmiştir [16].

Tablo 1. Eklemeli imalat yöntemleri (Additive manufacturing methods)

Eİ Teknolojisi	Tanımı
Binder Jetting (BJ)	Yapıştırıcı(bağlayıcı) püskürtme
Digital Light Processing (DLP)	Dijital ışık işleme
Direct Metal Deposition (DMD)	Direkt metal depozisyonu
Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	Direkt metal lazer sinterleme
Electron Beam Melting (EBM)	Elektron ışını ile ergitme
Fused Deposition Modeling (FDM)	Birleştirmeli yığma modellemesi
Laser Metal Deposition (LMD)	Lazer metal biriktirme
Laminated Object Manufacturing (LOM)	Lamine nesne imalatı
Multijet Modeling (MJM)	Çok jetli modelleme
Plaster Based Printing (PP)	Alçı esaslı baskı
Selective Heat Sintering (SHS)	Seçici ısıtılmalı sinterleme
Stereolithography (SLA)	Stereolitografi
Selective Laser Melting (SLM)	Seçici lazer eritme
Selective Laser Sintering (SLS)	Seçici lazer sinterleme

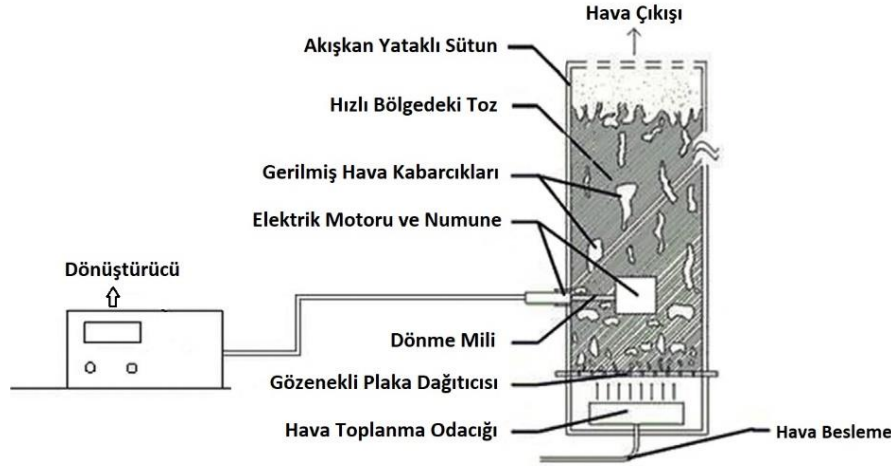
ASTM (Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu), 2012 yılında eklemeli üretim yöntemlerini üretimde kullanılan malzemenin türüne ve katmanların işlem süreçlerine göre 7 kategoriye ayırmıştır [17]. Bu kategoriler, ilgili Eİ teknolojisinde kullanılabilen materyaller ve yöntemin temel prensipleri göz önüne alınarak Tablo 2’de gösterilmiştir [16].

Tablo 2. İşlem çeşidine göre eklemeli üretim teknolojileri (Additive manufacturing technologies according to the type of process)

İşlem kategorisi	Açıklama	Teknolojiler	Materyaller
Toz yatağı füzyonu	Toz yatağında seçili bölgelerin ısı ile birleştirilmesi	SLS, SLM, EBM, DMLS, SHS	Metaller ve polimerler
Doğrudan enerji biriktirme	Eriyik malzemenin ısı enerjisiyle birleştirilmesi	LMD, DMD	Metaller
Malzeme yığma	Eriyik malzemenin nozül vasıtasıyla yığın haline getirilmesi	FDM	Polimer esaslı malzemeler
Fotopolimerleşme	Likit fotopolimer ham maddenin UV ışını ile katılaştırılması	SLA, DLP	Fotopolimerik reçineler
Yapıştırıcı püskürtme	Toz yatağına yapıştırıcı püskürtülerek tozların birleştirilmesi	BJ, PP	Polimerler, metaller, alçı, kum
Malzeme jeti	Malzemenin damlacıklar şeklinde biriktirilmesi	MJM, Polyjet	Polimerler, mumlar

3. Eİ ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN ALÜMİNYUM ALAŞIMLAR İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR (RESEARCHES ON ADDITIVELY MANUFACTURED ALUMINUM ALLOYS)

E. Atzeni vd. doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) ile üretilen AlSi10Mg alaşımlı yüzeylere bitirme işlemi (finiş) olarak aşındırıcılı akışkan yatak (AFB) yönteminin uygulanabilirliğini; yüzey ve aşındırıcılar arasındaki etkileşim, dönme hızı ve aşındırıcı tipi gibi parametrelerin işleme performansı ile ilişkilerini tespit ederek incelemiştir. Bu çalışma AFB yönteminin eklemeli imalat ile üretilmiş metal parçalar için, otomatikleştirilmesi kolay, düşük maliyetli, az zaman alan ve sürdürülebilir bir son yüzey işleme yöntemi olduğunu ortaya koymuştur [18].



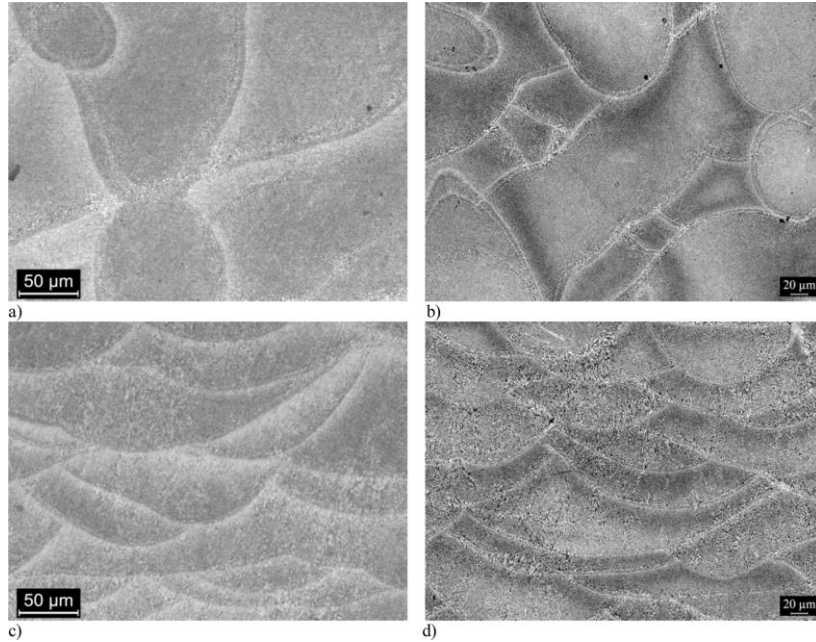
Şekil 2. AFB işlemi için gerekli ekipmanlar (Required equipment for AFB process)

Katmanlı üretim, imalat endüstrisinde devrim yapmaya başladıktan sonra araştırmacılar, metal eklemeli üretim süreçlerinin güvenilirliğini artırmak için çeşitli teknikler geliştirmeye başlamışlardır. Ancak metal matrisli kompozit bileşenlerin eklemeli imalatıyla ilgili çalışmalar yeterli olgunluğa erişememiştir. Çalışma kapsamında Al / AlN kompoziti, alüminyum tozu ve reaktif gaz olarak N₂ kullanılarak lazer ışını yoluyla biriktirildiği Direkt Lazer Biriktirme ekipmanı kullanılarak üretilmiştir. Lazer parametrelerinin fabrikasyon yapıların geometrisi, mikroyapısı ve özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucu elde edilen bilgiler, Doğrudan Lazer Biriktirme ile üretilen Al ve Al / AlN parçaları için bir işlem haritasının geliştirilmesine izin verdiği için büyük öneme sahiptir [19].

Butler vd. [20], bir eklemeli imalat yöntemi olan Seçici Lazer Eritme (SLE/SLM) ile üretilmiş AlSi10Mg alaşımının ısı iletkenlik özellikleri üzerinde işleme parametrelerinin ve ısı ışımlarının etkilerini araştırmışlardır. Termal iletkenliğin karakterizasyonu, yeni nesil termal üretim çözümlerinde katkı maddesi üretiminden yararlanmak isteyen mühendisler için özel bir öneme sahiptir. Deneysel karakterizasyon numunelerini üretmek için bir dizi işleme parametresi ve tarama stratejisi kullanılmıştır. Üretilen parçaların gözenekliliği ısı iletkenlik üzerinde önemli bir etkiye sahipken, tavlama ısı ışımları sonrası numunenin sahip olduğu ısı iletkenlik gözeneklilikte ölçülebilir herhangi bir değişiklik olmaksızın % 18-41 artmıştır. Elde edilen mikro yapıların taramalı elektron mikroskobu ve enerji dağıtıcı X-ışını kullanılarak gerçekleştirilen analizlerine bakıldığında, daha düşük bir etkiye sahip olan bekleme süresi ile artan ısı ışımlı sıcaklığı ile Si'nin çökeldiği ve birleştiği gözlenmiştir.

Takata vd. [21], SLM yöntemiyle üretilmiş AlSi10Mg alaşımının mikroyapısını ve mekanik özelliklerindeki değişiklikleri, 300 ve 530 °C'lik sıcaklıklarda ısı ışımları uygulanarak incelemiştir. Üretildiği şekliyle örnekler, karakteristik bir mikroyapısal morfoloji ve doku sergilemişlerdir. Yerel olarak eriyen ve hızla katılan bölgelere karşılık gelen eriyik havuzlarının,

ince ötektik Si parçacıklarıyla çevrili birkaç sütunlu α -Al tanelerinden oluştuğu belirlenmiştir. Sütunlu α -Al tanecikleri içinde düşük açılı sınırlardan oluşan ince bir dislokasyon alt yapısı mevcuttur. Bunun yanı sıra, uzun süreli maruziyetten sonra mikroyapısal dengeye ulaşan stabil bir intermetalik faz oluşumu meydana gelir. Üretildiği şekliyle numune, yaklaşık 480 MPa'lık yüksek bir gerilme mukavemeti göstermiştir. Bu mukavemet, çekme yönünden bağımsız olup normal olarak üretim yönüne paraleldir. Bunun tersine, gerilme sünekliğinin yöne bağlı olduğu bulunmuştur ve bu nedenle eriyik havuzu sınırında meydana gelen bir kırılmadan sorumlu olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar, SLM tarafından üretilen AlSi10Mg alaşımlarının gerilme özelliklerinin yön bağımlılığının kontrolü hakkında yeni bilgiler sunmaktadır.



Şekil 3. Numune mikro yapılarına ait optik görüntüleri (Optical images of sample microstructures)

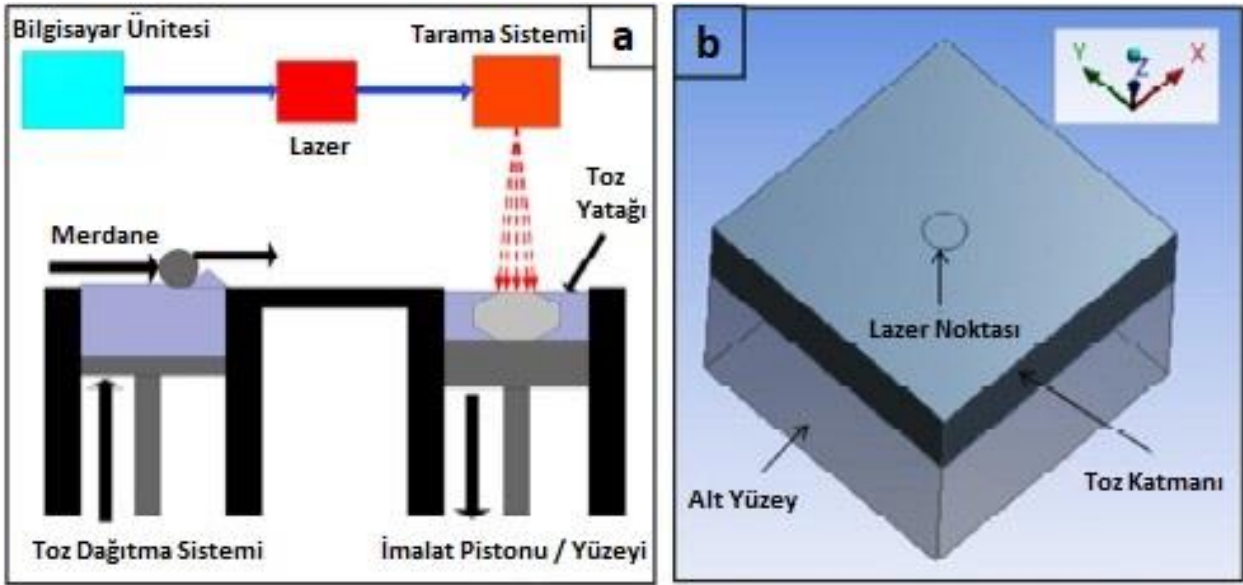
Bazı çalışmalar SLM yöntemiyle üretilmiş AlSi10Mg'nin mikro yapısını ve performansını karakterize etmeye çalışırken, özellikle anizotropik etkilerle ilgili yeterli çalışma yapılmamıştır. T. Maconachie ve arkadaşlarının çalışması [22] literatürdeki bu eksiği gidermek için yapılmıştır. AlSi10Mg numuneler SLM yöntemiyle üç farklı üretim açısıyla üretilmiş ve malzemenin gerilme özelliklerini karakterize etmek için $3,33 \times 10^{-2}$ ila $2,4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ arasında değişen oranlarda yarı statik ve dinamik bölünmüş Hopkinson çekme çubuğu testleri yapılmıştır. Üretilen numunelerin mikro yapısı ve başarısız numunelerin kırılma yüzeyleri analiz edilmiştir. Yarı-statik ve dinamik sonuçlar, mukavemet açısından yapı yönelimleri arasında çok az fark olduğunu, ancak üretim yönüne dik olarak yüklenen bileşenlerin diğer yapı yönelimlerine göre daha esnek olduğunu göstermiştir. Yapı oryantasyonunun, dinamik olarak test edilen numunelerin kırılma yüzey morfolojisini, eriyik havuzu sınırlarını takip eden kırılma yollarından dolayı etkilediği bulunmuştur.

4. EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLMİŞ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ MALZEME YAPISAL PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR (STUDIES RELATED TO DETERMINING THE MATERIAL CONSTITUTIVE PARAMETERS OF ADDITIVELY MANUFACTURED ALUMINUM ALLOYS)

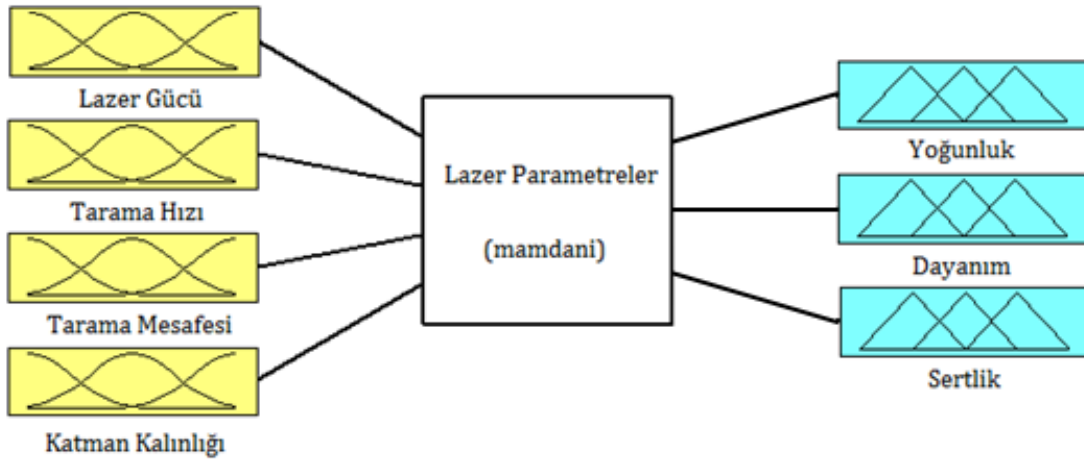
Metallerin akış tepkisini anlamak için gerilme oranı, gerilme hızı ve sıcaklığın birleşik etkilerini dikkate alarak metallerin akış davranışının doğru bir şekilde tahmin edilmesi, işlemenin sayısal modellenmesi ve simülasyonu için temel bir gerekliliktir.

Bir eklemeli imalat yöntemi olan Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) (Şekil 4), metal tozlarının katmanlar halinde serildikten sonra lazer ışını aracılığıyla sinterlenerek tozların

birleştirilmesi ve parça oluşumunun sağlanması mantığını temel alan bir teknolojidir. Bu yöntemde, tarama hızı, lazer gücü, katman kalınlığı, tarama yönü ve tarama mesafesi gibi giriş parametreleri üretilecek parçanın mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Duman vd. yaptıkları çalışmada bir Bulanık Mantık Modeli (Şekil 5) oluşturarak üretilecek parçaya en uygun giriş parametrelerini belirlemeye çalışmışlardır. Bu sayede malzemeye ait mekanik özellikleri tahmin etmek için gerçek denemelere ihtiyaç duymadan gerekli parametreler belirlenerek zaman ve maliyet açısından kazanç sağlanabilmektedir. Çalışma sonucunda, 316L paslanmaz çeliğin DMLS ile üretimi için 350-800J/mm³ hacimsel enerji yoğunluğunu sağlayacak giriş parametrelerinin belirlenmesiyle optimum çekme dayanımı ve sertlik değerlerine sahip ürünlerin oluşturulabileceği belirlenmiştir [23].



Şekil 4. (a) DMLS sürecinin şematik diyagramı; (b) hesaplama alanı (Schematic diagram of the DMLS process; (b) calculation area)



Şekil 5. İşlem parametrelerinin tahminine yönelik kurulan bulanık mantık model şematığı (Fuzzy logic model schematic for estimation of process parameters)

Zhang vd. [24], 7075-T6 alüminyum alaşımı için dinamik çekme davranışları değiştirilmiş bir Johnson-Cook modeli geliştirmişlerdir. Bunun için öncelikle 7075-T6 alüminyum alaşımının çeşitli gerinim oranlarındaki dinamik mekanik davranışları, elektronik universal test makinesi, yüksek hız test sistemi ve bölünmüş Hopkinson Basınç Çubuğu (SHBÇ) kullanılarak dinamik çekme testleri ile ölçülerek farklı oranlarda gerilme-gerinim eğrileri elde edilmiştir. Sonuçlar, 7075-T6 alüminyum

alaşımının gerilme oranının neden olduğu sertleştirme etkisinin önemli olduğunu göstermektedir. Johnson-Cook malzeme modelinde gerinim oranı sertleştirme terimi değiştirilerek, 7075-T6 alüminyum alaşımı için yeni bir Johnson-Cook (J-C) malzeme modeli elde edilmiştir. Geliştirilen bu yeni model deney sonuçları ile yüksek uyum göstermektedir. J-C malzeme modeli ile 7075-T6 alüminyum alaşımı için farklı oranlarda çekme testlerinin sayısal simülasyonları yapılmıştır. 7075-T6 alüminyum alaşımının çekme yükü ve gerilme-şekil değiştirme ilişkisine göre hesaplama sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak değiştirilmiş J-C modelinin doğruluğu pekiştirilmiştir.

5. MALZEME YAPISAL PARAMETRELERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE DOĞRULANMASI ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR (STUDIES ON VERIFICATION OF MATERIAL CONSTITUTIVE PARAMETERS USING THE FINITE ELEMENT METHOD)

Seçici lazer eritme (SLM) yöntemi geleneksel imalat işlemlerine kıyasla daha kontrol edilebilir hacim fraksiyonuyla periyodik kafes yapıları oluşturmaya imkân sağlaması açısından önemlidir. Zhang vd. [25] 7055-T6I4 alüminyum alaşımının dinamik darbe özellikleri ve hasar mekanizmasına ait bilgi eksikliğini gidermek için dinamik şok performansı üzerine deneysel ve simülasyona dayalı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bunun için öncelikle 7055 alüminyum alaşımı için temel Johnson-Cook denklemi ve hasar modeli oluşturulmuştur. Dinamik etkilerin performansı deneysel ve simülasyon yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar şunu göstermektedir: 120 ° C'nin altında, alaşımın mikro yapısı dinamik şoktan sonra önemli ölçüde değişmiştir, şok gerilme hızı arttıkça η' çökelmiş fazların sayısı ve yoğunluğu önemli ölçüde azalmıştır; 220 ° C'nin altında, dinamik şokun gerilme hızı 6000 s⁻¹ olduğunda, test parçasındaki η' çökelmiş fazların sayısı ve yoğunluğu şoktan sonra önemli ölçüde azalmıştır; 220 ° C'nin altında, şok gerinim hızı arttıkça hemen hemen tüm η' çökelmiş fazlar, alüminyum matris ile tutarsız bir η fazına dönüşmüştür. Aynı zamanda ve hızda, dinamik şoktan sonraki stres, dinamik sıcaklık 220 ° C olduğunda en büyüktür; ortam sıcaklığı 120 ° C olduğunda, dinamik şok sonrası stres en küçüktür ve 220 ° C'de dinamik şok sonrası stres 120 ° C'deki stresin iki katıdır.

Pawar vd. [26] 7.62AP mermilerin seramik / alüminyum çift katmanlı hibrit malzemeler üzerindeki etkisini Ansy programına ait sonlu elemanlar yöntemini temel alan AUTODYN hydrocode modülünü kullanarak incelemişlerdir. Metal için Johnson – Cook malzeme modeli, seramik için ise Johnson– Holmquist modeli kullanılmıştır. Modeller, Al₂O₃ / Al 5083 ve AlN / Al 5083 çift katmanlı kompozitler üzerinde yapılan deneylerle doğrulanmıştır. AlN seramiğinin Al₂O₃ seramiklerine göre mermiyi yenmede üstün performansa sahip olduğu görülmüştür. Destek plakasının deformasyonu ve karşılık gelen plastik gerilme enerjileri, performans parametreleri için bu çalışmada dikkate alınmıştır. Sonuçlar, kullanılan mühimmat hızlarında 7.62AP mermilerin etkisine karşı korumaya yönelik verimli bir yapı geliştirmek için malzemelerin en uygun şekilde tasarlanmasını sağlaması açısından öneme sahiptir.

Eklemeli İmalat (Eİ) ile üretilmiş metal parçaların mikro yapısını ve mekanik özelliklerini geliştirmek için üretim sonrasında ultrasonik darbe işleme (UIT) uygulamalarını birleştiren hibrit bir yaklaşım geliştirilmiştir. Zhou vd. [27], katmanlı olarak imal edilen 304 paslanmaz çelik (Stainles Steel-SS) numuneler üzerindeki ultrasonik etkinin gerilme ve gerinim alanlarını analiz etmek için deneysel ve sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada kullanılan numuneler Lazer Metal Biriktirme (LMB) tekniği kullanılarak üretilmiş ve daha sonrasında ultrasonik darbe işleme uygulamalarına tabi tutulmuştur. UIT işleminde metalik malzemelerin yüksek gerinim oranı etkisi dikkate alınarak 304 SS numunesinin dinamik sertleşme özellikleri bir bölünmüş Hopkinson Basınç Çubuğu (SHBÇ) kullanılarak ölçülmüştür. SHBÇ testlerinde numunenin gerinim hızı kontrol faktörleri ve gerilme-gerinim ilişkisi teorik olarak analiz edilerek UIT'ye ait pim hızı, gerilme alanı ve plastik gerilme alanı da dahil olmak üzere ünitenin dinamik ve yüksek geçici darbe-geri tepme-darbe işlemi, üç boyutlu bir sonlu elemanlar modeli ile sayısal olarak incelenmiştir. Ayrıca gerçekleştirilen mikroskop analizleri ve mikro sertlik testlerine ait deneysel sonuçlar plastik deformasyon bölgesine ait sayısal sonuçlarla iyi bir uyum içerisindedir. Yapılan bu çalışma

ultrasonik işleme uygulamalarının metal Eİ ürünlerinin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesini sağladığını doğrulamaktadır.

Zhang vd. [28], metal Seçici Lazer Eritme (SLM) sırasında gerçekleşen ısı değişimlerini incelemek için bir sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir. Oluşturdukları yaklaşım, oluşturulan iş parçası ile erimemiş toz arasındaki ara yüzü ve gaz alanı ile ardışık toz yatağı katmanları arasındaki ara yüzü izlemek için bir seviye ayar çerçevesi kullanılarak oluşturulacak parçanın ölçeğinde gerçekleştirilir. Hesaplama verimliliğini sürdürülebilir kılmak için, toz yatağı biriktirme ve enerji girişi, her bir katmanın tamamının veya fraksiyonlarının ölçeğiyle basitleştirilir. Katman fraksiyonları, doğrudan inşa edilecek parçanın global lazer tarama planının bir tanımından tanımlanır. Her fraksiyon, lazer ışınına maruz kalma süresine karşılık gelen bir zaman aralığı boyunca ısıtılır ve daha sonra, dikkate alınan katman fraksiyonu için tarama süresine eşit bir zaman aralığında soğutulur. Hesaplama maliyetini düşürmek için, uygun bir ağ stratejisi ile bir iyileştirme ve rafine etme ağ uyarlaması gerçekleştirilir. Çalışma sonucunda önerilen modelin, karmaşık geometrinin parçaları için makro ölçekte SLM işlemi sırasında inşa edilmiş iş parçası ve erimemiş tozdaki sıcaklık dağılımını ve gelişimini tahmin edebilir düzeyde olduğu belirtilmiştir. Çalışma süresince nikel bazlı bir alaşım olan IN718 için uygulamalar gerçekleştirilmiş olup oluşturulan sayısal model ve veri setleri kullanılarak diğer malzemelere uyarlanabilir.

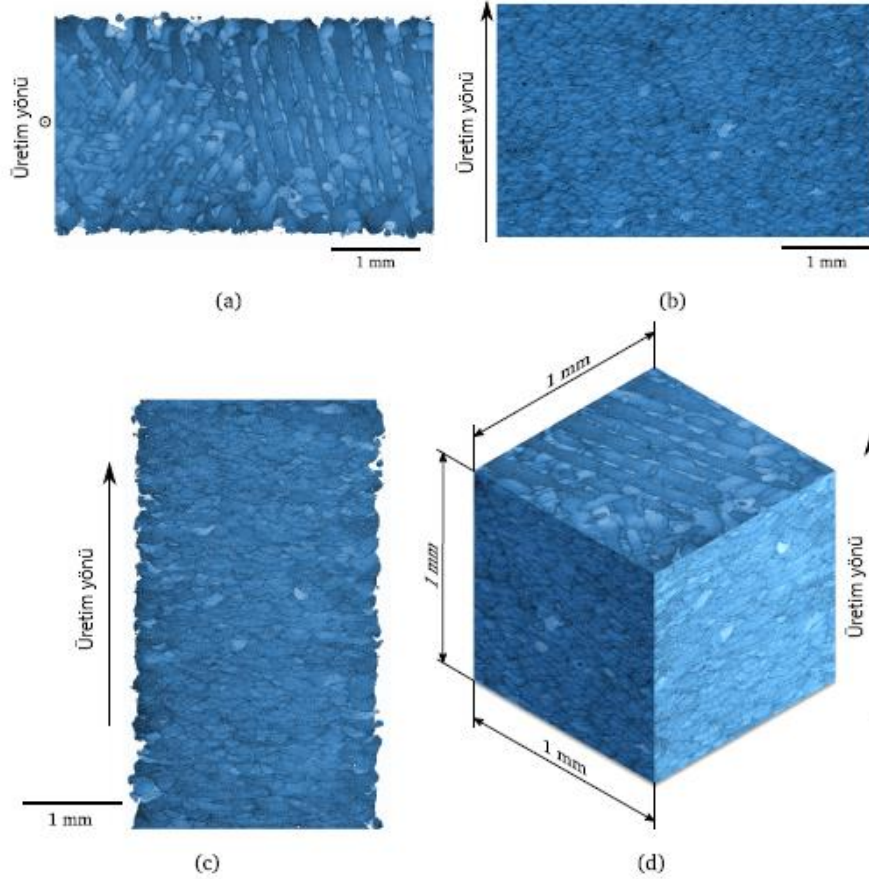
Niu vd. [29], A356 alaşımının gerilme yumuşamasını dikkate alan değiştirilmiş bir Johnson-Cook modeli geliştirmişlerdir. A356 alaşımını numunelere, değişen gerilme oranlarında ve 300 ila 500°C arasındaki sıcaklıklarda sıkıştırma deneyleri uygulanarak deformasyon parametrelerinin akış gerilmesinin uzama yumuşamasına etkisi araştırılmıştır. Mikroyapının gözlemlenmesi, yüksek sıcaklık ve yüksek gerilmenin dinamik yeniden kristalleşme davranışı için uygun olduğunu göstermiştir. Öngörülebilirliği geliştirmek için, gerilme yumuşatma mekanizmasını dikkate alan değiştirilmiş bir Johnson-Cook (J-C) modeli önerilmiştir. J-C modeli ve değiştirilmiş J-C modeli deneysel verilere göre hesaplanmıştır. J-C modelinin aksine, önerilen yeni model daha iyi korelasyona ve daha küçük ortalama mutlak hataya (%1,46) sahiptir. Ayrıca sabit indirgeme hızında termal sıkıştırma deneyleri ve yeni modele göre sonlu eleman simülasyonları yapılmıştır. Yük-yer değişim eğrisinin sahip olduğu yüksek tutarlılık, geliştirilen yeni modelin A356 alüminyum alaşımı için iyi bir tahmin doğruluğuna sahip olduğunu göstermiştir.

Liu vd. [30], 2519A alüminyum alaşımının akış gerilimi üzerinde gerilme hızı ve sıcaklığın etkilerini analiz etmek için öncelikle alaşıma dinamik darbe testleri ve yarı statik çekme testleri uygulayarak alaşımın dinamik mekanik özelliklerini belirlemişlerdir. Ardından gerilme hızı ve sıcaklığın mikroyapı gelişimi üzerindeki etkilerini optik mikroskop (OM) ve transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ile incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar, 2519A alüminyum alaşımının dinamik etki altında gerilme hızına bağımlılık ve sıcaklığa duyarlılık sergilediğini göstermektedir. Johnson-Cook malzeme modeli için gerekli olan sabitler, değişken ayırma ve doğrusal olmayan uyarlanmış yöntemler kullanılarak yarı-statik testler ve SHBÇ deneyleri ile belirlenmiştir. Çalışma sonucunda belirlenen yapısal denklemin, mekanik özellikler ve balistik performansın sayısal simülasyonu için referans sağlayan deneysel sonuçlarla tutarlı olduğu belirlenmiştir.

Luo vd. [31], toz yatağı füzyonu ile üretilen eklemeli imalat ürünlerine ait işlem parametrelerini optimize ederek üretilecek parçanın mekanik performansını iyileştirmek için sonlu elemanlar modeli oluşturmaya yönelik çalışma yapmışlardır. Öncelikli olarak toz yatağı füzyonu simülasyonlarına ait güncel sonlu eleman modelleri gözden geçirilmiştir. Hesaplama maliyetini düşürmek için kullanılan simülasyon teknikleri üzerinde durulmuştur. Ardından, toz yatağı füzyon proseslerinin simülasyonundaki mevcut sonlu eleman modelleri gözden geçirilmiştir. Yapılan bu çalışma malzeme tasarımı, proses içi izleme-kontrol ve proses optimizasyonu gibi diğer Eklemeli Üretim konularıyla bağlantılı olarak sonlu elemanlar yönteminin önemini ortaya koymaktadır.

Costas vd. [32], seçici lazer eritme (SLM) ile üretilen AlSi10Mg kare kutuların yarı statik yüklemesi üzerine deneysel ve sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Amaç, ortak sonlu eleman modelleme tekniklerinin malzeme ve bileşen ölçeklerinde, büyük deformasyonlar ve kırılma altında 3B üretilmiş parçalara uygulanabilirliğini değerlendirmektir (Şekil 6). Tek eksenli çekme

numuneleri çıkarılmış ve farklı yönelimlerde test edilmiş ve Voce sertleştirme ve Cockcroft-Latham kırılma kriterine sahip hipoeplastik-plastik bir model deneysel sonuçlara göre kalibre edilmiştir. Kutular, küresel bir aktüatör kullanılarak bozulana kadar yanal olarak ezilmiştir. Ele alınan malzeme ve sonlu eleman modellerinin, incelenen senaryoda eklemeli imalatla üretilen bileşenlerin yapısal tepkisinin tahmini için çok uygun olduğu kanıtlanmıştır.



Şekil 6. Malzemenin mikro yapısının metalografik resimleri: üstten görünüş (a), önden görünüş (b), yandan görünüş (c) ve üç boyutlu görüntü (d) (Metallographic pictures of the microstructure of the material: top view (a), front view (b), side view (c) and three dimensional view (d) [32].

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND SUGGESTIONS)

Modern üretim yöntemlerinin gelişmesiyle birlikte imalat malzemesi olarak kullanılan alüminyum alaşımlarından beklenen performans ve yapı özellikleri de artmaktadır. Üretim malzemesine ait özelliklerin üretim öncesinde doğru bir şekilde belirlenebilmesi amacıyla kullanılan yöntemler zaman ve maliyet kaybının önüne geçmektedir. Malzemeye ait yapısal parametreler kullanılarak gerçekleştirilen simülasyon ve analiz uygulamaları bu yöntemler içerisinde önemli bir yere sahiptir. Bilgisayar ve yazılım alanlarındaki gelişmelere paralel olarak malzeme geliştirme çalışmalarında kullanılan matematiksel modeller, deneysel testlerin yerini almaktadır.

Eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak üretilmiş alüminyum alaşımlarının özelliklerine dair yapılmış çalışmalar incelendiğinde bu çalışmaların daha çok malzemenin dinamik özelliklerine yoğunlaşan deneysel uygulamalar olduğu görülmektedir. Ancak bu alaşımlara ait malzeme yapısal parametrelerinin elde edilebilmesi amacıyla yapılmış çalışmalar yetersiz kalmaktadır. Bu çalışma kapsamında eklemeli imalat yöntemlerinde yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımlarının dinamik özelliklerinin tahmini ve geliştirilebilmesi amacıyla yapılan uygulamalar ve malzeme yapısal parametrelerine dair yapılmış çalışmalar derlenmiştir.

Eklemeli imalat ile üretilmiş ürünler döküm üretim yöntemiyle üretilmiş muadillerine kıyasla daha homojen oldukları için daha yüksek akma ve kopma dayanımı göstermektedirler. Bu homojenliği sağlayan temel etken toz karışımının tanecik boyutu ve karışım oranıdır. Eklemeli imalatla kullanılacak malzemeye ait bileşimin doğru belirlenmesi nihai ürünü doğrudan etkilediği için büyük öneme sahiptir. Alüminyum alaşım tozları kullanılarak gerçekleştirilen üretimlerde toz karışımına eklenecek sıkıştırıcı malzeme takviyesi ile malzemede oluşacak mikro çatlakların önüne geçilebildiği yapılan çalışmalarda görülmektedir. Bunun yanı sıra üretim sonrası uygulanacak ısıtma yaşlandırma işlemleri de bu çatlakların oluşumunu engelleyerek mekanik özelliklerin optimize edilmesini sağlamaktadır. Bu özelliklerdeki gelişim oranları gerçekleştirilen testler ve oluşturulan malzeme modelleri ile incelenmiştir. Konuyla ilgili yapılan çalışmalarda elde edilen malzeme modellerine ait veriler deneysel verilerle büyük oranlarda benzerlik göstermektedir. Özellikle J-C malzeme modelinin geliştirilmesi ile oluşturulan modeller yüksek başarımlı göstermektedir. Bu nedenle her geçen gün kullanım alanı ve çeşitliliği artan alüminyum alaşımlarının geliştirilmesine yönelik yapılan çalışmalarda deneysel uygulamaların yerine malzeme modelleri daha sık kullanılmaya başlanmıştır. Ancak yapılan bu çalışmalar henüz yeterli sayıya ulaşmamış olup sadece yaygın alüminyum alaşımlarına dair veriler literatüre kazandırılmıştır. Bu derleme çalışması ışığında yapılacak yeni çalışmalarda farklı alüminyum alaşımları kullanılarak üretilmiş malzemelere yönelik malzeme modelleri oluşturulabilir, daha önce oluşturulmuş modeller geliştirilebilir. Geliştirilecek modeller, alüminyum eklemeli imalat ürünlerinin başta havacılık-uzay ve savunma alanlarının yanı sıra hayatımızın birçok yerindeki kullanımının artmasını sağlayacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje no: FYL-2020-2305).

REFERENCES (KAYNAKLAR)

1. J.C. Williams, E.A. Starke, Progress in structural materials for aerospace systems, *Acta Mater.* 51, 5775–5799, 2003.
2. A. Heinz, A. Haszler, C. Keidel, S. Moldenhauer, R. Benedictus, W.S. Miller, Recent development in aluminium alloys for aerospace applications, *Mater. Sci. Eng. A.* 280, 102–107, 2000.
3. C. Kammer, C. Kammer, *Aluminium Handbook*, Aluminium-Verlag Marketing & Kommunikation GmbH, Germany, 1999, 61–73, 1999.
4. J. Zhang, B. Song, Q. Wei, D. Bourell, Y. Shi, A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends, *J. Mater. Sci. Technol.* 35, 270–284, 2019.
5. V. Romanova, R. Balokhonov, O. Zinovieva, E. Emelianova, E. Dymnich, M. Pisarev, A. Zinoviev, Micromechanical simulations of additively manufactured aluminum alloys, *Comput. Struct.* 244, 106412, 2021.
6. E. Atzeni, A. Salmi, Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 62, 1147–1155, 2012.
7. N. (Neil) Hopkinson, R.J.M. Hague, P.M. Dickens, *Rapid manufacturing : an industrial revolution for the digital age*, John Wiley, Chichester, England, 2006.
8. M.G. Violante, L. Iuliano, P. Minetola, Design and production of fixtures for free-form components using selective laser sintering, *Rapid Prototyp. J.* 13, 30–37, 2007.
9. Survey: the solid future of rapid prototyping. *The Economist* 358(8214):49–51, 2001.
10. M. Walter, J. Holmström, H. Yrjölä, Rapid manufacturing and its impact on supply chain management, *Proc. Logist. Res. Netw. Annu. Conf.* (2004) 12.
11. Selective laser sintered parts used directly in spacecraft production. *Rapid Prototyping Report* 9(11), 1999.
12. N. Hopkinson, P. Dickens, Rapid prototyping for direct manufacture, *Rapid Prototyp. J.* 7, 197–202, 2001.
13. A. Griffiths, Rapid manufacturing—the next industrial revolution. *Mater World* 10(12)34–35, 2002.

- 14.E. Atzeni, L. Iuliano, P. Minetola, A. Salmi, Redesign and cost estimation of rapid manufactured plastic parts, *Rapid Prototyp. J.* 16, 308–317, 2010.
- 15.D. Manfredi, F. Calignano, E.P. Ambrosio, M. Krishnan, R. Canali, S. Biamino, M. Pavese, E. Atzeni, L. Iuliano, P. Fino, C. Badini, Direct Metal Laser Sintering: An additive manufacturing technology ready to produce lightweight structural parts for robotic applications, *Metall. Ital.* 105, 15–24, 2013.
- 16.İ. Özgen, Endüstri 4.0’da Robotik ve Eklemeli Üretim Teknolojilerinin Farklı Rekabet ve Üretim Senaryoları Altında Stratejik Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2019.
- 17.K. Kellens, M. Baemers, T.G. Gutowski, W. Flanagan, R. Lifset, J.R. Duflou, Environmental Dimensions of Additive Manufacturing: Mapping Application Domains and Their Environmental Implications, *J. Ind. Ecol.* 21, S49–S68, 2017.
- 18.E. Atzeni, M. Barletta, F. Calignano, L. Iuliano, G. Rubino, V. Tagliaferri, Abrasive Fluidized Bed (AFB) finishing of AlSi10Mg substrates manufactured by Direct Metal Laser Sintering (DMLS), *Addit. Manuf.* 10, 15–23, 2016.
- 19.A. Riquelme, P. Rodrigo, M.D. Escalera-Rodriguez, J. Rams, Effect of the process parameters in the additive manufacturing of in situ Al/AlN samples, *J. Manuf. Process.* 46, 271–278, 2019.
- 20.C. Butler, S. Babu, R. Lundy, R. O’Reilly Meehan, J. Punch, N. Jeffers, Effects of processing parameters and heat treatment on thermal conductivity of additively manufactured AlSi10Mg by selective laser melting, *Mater. Charact.* 173, 110945, 2021.
- 21.N. Takata, H. Kodaira, K. Sekizawa, A. Suzuki, M. Kobashi, Change in microstructure of selectively laser melted AlSi10Mg alloy with heat treatments, *Mater. Sci. Eng. A.* 704, 218–228, 2017.
- 22.T. Maconachie, M. Leary, J. Zhang, A. Medvedev, A. Sarker, D. Ruan, G. Lu, O. Faruque, M. Brandt, Effect of build orientation on the quasi-static and dynamic response of SLM AlSi10Mg, *Mater. Sci. Eng. A.* 788, 139445, 2020.
- 23.B. Duman, M.C. Kayacan, Doğrudan Metal Lazer Sinterleme / Ergitme Yöntemi ile İmal Edilecek Parçanın Mekanik Özelliklerinin Tahmini Predicting The Mechanical Properties Of The Part Produced By Direct Metal Laser Sintering / Melting Method, 2017.
- 24.D.N. Zhang, Q.Q. Shangguan, C.J. Xie, F. Liu, A modified Johnson-Cook model of dynamic tensile behaviors for 7075-T6 aluminum alloy, *J. Alloys Compd.* 619, 186–194, 2015.
- 25.P. Zhang, Y. Wang, Y. Xie, Y. Zhou, A study on the dynamic shock performance of 7055-T6I4 aluminum alloy based on experimental and simulation, *Vacuum.* 157, 306–311, 2018.
- 26.M.J. Pawar, A. Patnaik, S.K. Biswas, U. Pandel, I.K. Bhat, S. Chatterjee, A.K. Mukhopadhyay, R. Banerjee, B.P. Babu, Comparison of ballistic performances of Al₂O₃ and AlN ceramics, *Int. J. Impact Eng.* 98, 42–51, 2016.
- 27.C. Zhou, J. Wang, C. Guo, C. Zhao, G. Jiang, T. Dong, F. Jiang, Numerical study of the ultrasonic impact on additive manufactured parts, *Int. J. Mech. Sci.* 197, 106334, 2021.
- 28.Y. Zhang, G. Guillemot, M. Bernacki, M. Bellet, Macroscopic thermal finite element modeling of additive metal manufacturing by selective laser melting process, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 331, 514–535, 2018.
- 29.L. Niu, M. Cao, Z. Liang, B. Han, Q. Zhang, A modified Johnson-Cook model considering strain softening of A356 alloy, *Mater. Sci. Eng. A.* 789, 139612, 2020.
- 30.W. LIU, Z. HE, Y. CHEN, S. TANG, Dynamic mechanical properties and constitutive equations of 2519A aluminum alloy, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* 24, 2179–2186, 2014.
- 31.Z. Luo, Y. Zhao, A survey of finite element analysis of temperature and thermal stress fields in powder bed fusion Additive Manufacturing, *Addit. Manuf.* 21, 318–332, 2018.
- 32.M. Costas, D. Morin, M. de Lucio, M. Langseth, Testing and simulation of additively manufactured AlSi10Mg components under quasi-static loading, *Eur. J. Mech. A/Solids.* 81, 103966, 2020.