

1. GİRİŞ

Metal enjeksiyon kalıplama (MIM) teknolojisi, bir toz metalurjisi üretim yöntemi olup ilk zamanlarda geleneksel toz metalurjisi yöntemleriyle beraber kullanılmış, daha sonra kendi başına ayrı bir imalat yöntemi halini almıştır. Enjeksiyon kalıplama, genellikle, karmaşık şekilli plastik malzeme üretim yöntemi olarak bilinir. 1920'lerden bugüne yöntem geleneksel plastik uygulamalarının yanı sıra metal ve seramik tozlarına da uygulanarak teknolojisi geliştirilmektedir. Metal tozlarına uygulanan bu yeni teknoloji 'toz metal enjeksiyon kalıplama (MIM)' olarak bilinir.

Enjeksiyon yöntemi ile plastik malzemelerin şekillendirilmesi yıllardan beri uygulanan bir imalat metodudur. Hemen hemen her gün hayatımıza karmaşık şekilli yeni bir plastik parça girmektedir. Çoğu kez farkına bile varamadığımız bu parçaların en büyük özelliği göreceli olarak ucuz olmalarıdır. Ancak diğer taraftan birçok mühendislik uygulaması için de bu termo-plastik malzemeler yeterli mekanik özelliklere (sertlik, mukavemet, yüksek sıcaklıklarda çalışabilme vs.) sahip değildir. Gerçi bu plastik malzemelere metal ya da seramik katkı maddeleri ilave edilmesi suretiyle birçok geliştirme yapılmıştır. Fakat gerçek ilerleme katkılı plastik yerine, yüksek oranda metal tozunun plastik içerisine karıştırılması suretiyle elde edilen plastik bağlantılı metal malzemenin bulunması ile sağlanmıştır. Plastik bağlayıcının dikkatli bir şekilde ayrıştırılarak yapıdan uzaklaştırılması sonucunda geriye sadece metalden oluşan gözenekli bir iskelet yapı kalır. İşte bu iskelet metal de tıpkı klasik toz metalurjisinde olduğu gibi sinterlenerek metalik bağlantıların teşkil edilmesi ve gözeneklerin kapanması suretiyle metal parça haline dönüştürülür.

Metal Enjeksiyon Kalıplama (MIM) Teknolojisi Nedir?

Metal Enjeksiyon (MIM) ve karmaşık şekilli, yüksek yoğunluklu, yüksek performanslı metal parçalar üretmek için toz metalurjisi ve termoplastik enjeksiyon teknolojilerini birleştiren bir üretim yöntemidir. MIM prosesi en iyi olarak küçük parçalara uygulanırken (100 gramın altındaki parçalara), plastik enjeksiyon ve çinko kalıba döküm yöntemlerine göre çok daha iyi mekanik özellikler ve metal işleme ve hassas döküm yöntemlerine göre çok daha ucuz üretim imkânı sunmaktadır. 1970'lerin ortalarından beri ticari olarak uygulanmakta olan Metal Enjeksiyon Kalıplama Prosesi, otomotiv sistemleri, tıp ve diş hekimliği cihazları, ortodonti, silah, donanım ve kilit bileşenlerinde ve bilgisayar ve elektronik uygulamalarında kendine yer bulmuştur. MIM endüstrisinin, 2010 yılı itibarıyla 2 milyar USD'e varan bir pazar büyüklüğüne erişeceği tahmin edilmektedir. MIM teknolojisi karmaşık ve zor parçaların kaliteli bir biçimde ve yüksek miktarlarda üretilmesini gerektiren durumlarda diğer imalat teknolojilerine göre avantaj taşımaktadır

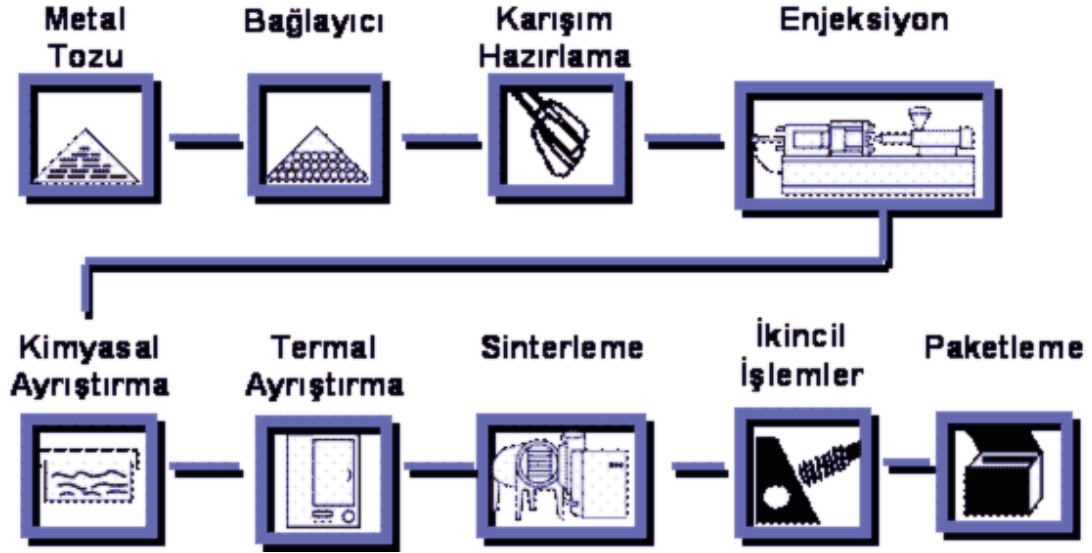
Metal Enjeksiyon Kalıplama Uygulamaları

- Otomotiv Sistemleri - Direksiyon Kolonlar (Aktüatörler, Ateşleme Kilit Bileşenleri), Sunroof (Durdurma Kamları), Oturma Mekanizmaları, Solenoidler, Yakıt Enjektörleri
- Ortodonti – Diş Telleri, Bukkal Tüpler
- Tıp Ve Diş Hekimliği Cihazları - Endoskopik Cerrahi Aletler
- Ateşli Silah Bileşenler - Tetik, Güvenlik Kilidi, Kurma Kamı, Gez, Arpacık
- Donanım Ve Kilit Parçaları - Kilit Silindirleri, Cıvata, Kilit Dili, Kenar Çubuğu
- Bilgisayar Ve Elektronik - Disk Bileşenleri
- Elektrik - Bağlayıcılar, Anahtarlar

2. METAL ENJEKSİYON KALIPLAMA YÖNTEMİ

Metal Enjeksiyon Kalıplama prosesininin temel adımları Şekil.1'de gösterilmiştir. Metal tozları sıcak olarak organik bağlayıcılarla karıştırılır. Toz olarak üretilen hemen hemen her çeşit metal ve metal alaşımı MIM'de kullanılabilir. Alaşımsız ve düşük alaşımlı çelikler, paslanmaz çelikler, yüksek hız çelikleri, bakır bazlı alaşımlar (pirinç, bronz vs.), nikel ve kobalt esaslı süper alaşımlar (invar, kovar vb.), titanyum, manyetik alaşımlar,

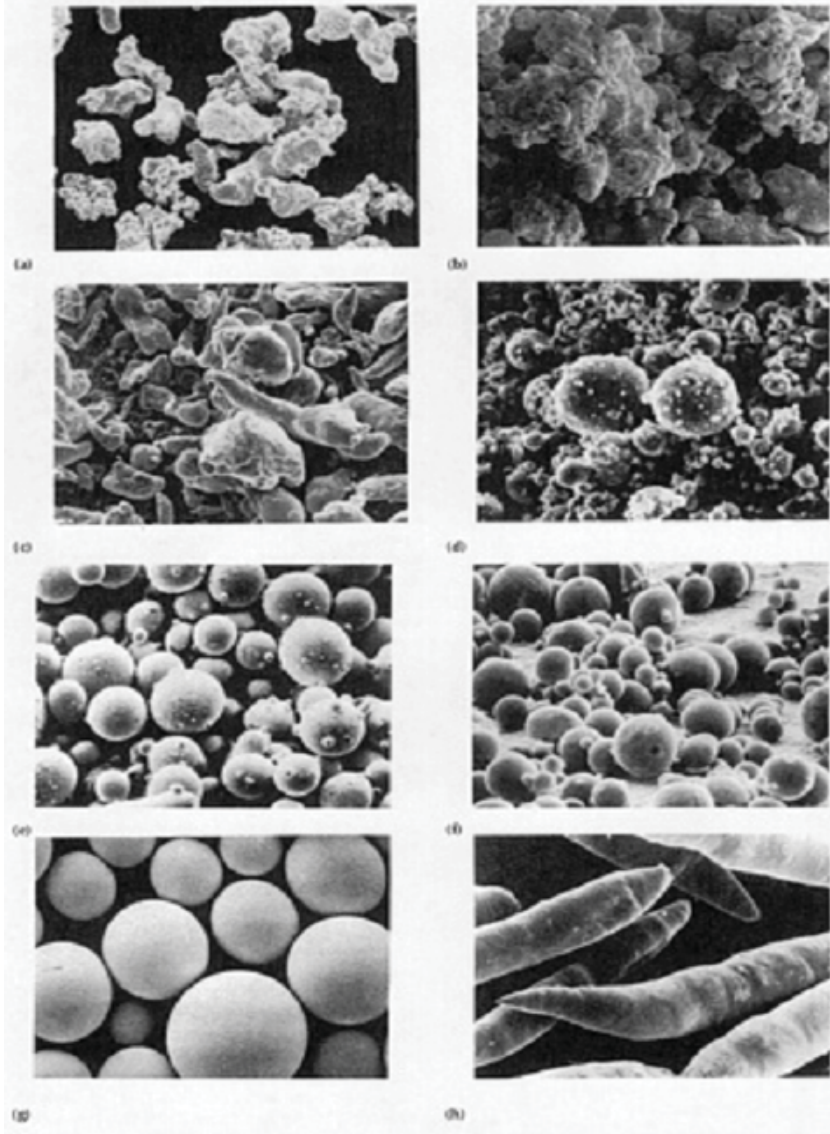
refrakter malzemeler ve sert maden (tungsten karbür) bu malzemelerden örneklerdir (detay için yazının sonunda verilen malzeme listesine bakınız). Sadece alüminyum ve magnezyum bunların dışındadır. Bağlayıcı olarak da termoplastik malzemeler (parafin, antipirin, balmumu, naftalin, fıstık yağı, stearik ve oleik asitler, esterler vs.), poliasetal (polioksimetilen) ve jelatin türevi malzemeler (metil selüloz, gliserin, borik asit vs.) kullanılmaktadır. Homojen ve uniform olarak elde edilen karışım soğutulur granülize edilir. Belli bir granül büyüklüğüne sahip malzeme enjeksiyon preslerinde kullanılır. Enjeksiyon işleminde kullanılan presler plastik endüstrisinde kullanılan makinalara çok benzer.



Şekil 1: Metal Enjeksiyon Kalıplama Prosesi

Metal Tozları

Uygun bir toz halinde üretilmiş neredeyse herhangi bir metal MIM tarafından işlenebilir. Alüminyum, yüzeyinde her zaman yapışık halde bulunan oksit tabakası nedeniyle sinterlemeyi engellediğinden bir istisna olarak karşımıza çıkmaktadır. Birçok çeşit metal ve alaşımları, kompozit yapılar - düşük alaşımlı çelikler, paslanmaz çelikler, sert metaller, manyetik alaşımlar, takım çelikleri, intermetalik malzemeler, süper alaşımlar, sementit karbürler - MIM teknolojisinde kullanılacak tozların listesindedirler. Ancak, bakış ekonomik açıdan en umut verici adaylar daha pahalı malzemeler. Bu, işleme dahil alternatif süreçler aksine, hemen hemen gerekli biçimde tozu üretiminde yüksek maliyeti dengelemek için yardımcı bir hurda olduğunu gerçeği ile muhasebeleştirilir. Hurda ucuz metallerin durumunda daha az önem taşımaktadır. Bu kadar çok çeşitlilik olması, bu kadar çok adayın ekonomik olarak üretilebilmesi için 'uygun toz' kullanılması gerekmektedir.



Şekil 2: Örnek tozların SEM görüntüleri. (a) Su ile atomize edilmiş bakır. (b) Su ile atomize edilmiş demir, (c) Hava ile atomize edilmiş alüminyum. (d) Helyum ile atomize edilmiş alüminyum. (e) Nitrojen ile atomize edilmiş yüksek hız çeliği. (f) Vakum atomize Inconel – 100 süperalaşımı . (g) PREP-atomize René 95 süper alaşımı (dendritik yapı). (h) Dönme delikli kap ile üretilmiş alüminyum iğneleri. Courtesy of Huppmann and Dalal

Tane şekli bir dizi nedenle önemlidir:

Bu tozlar mümkün olduğu kadar yüksek metal oranına sahip olmalıdırlar ki bu da yüksek paketlenilme yoğunluğuna sahip olduklarını gösterir. Küresel veya küresele yakın şekilli tozlar, paketlenilirlikleri yüksek olduğundan en çok tercih edilenlerdir. Fakat bağlayıcı giderme işlemi (ayırıştırma işlemi) sırasında yapının çarpılma, bozulma riski de artar.

Ortalama partikül büyüklüğü ve partikül büyüklüğü dağılımı da önemlidir:

İnce taneli tozlar bilindiği gibi kaba taneli tozlara göre sinterleme için daha çok tercih edilirler. Fakat bunların da birçok sınırlayıcı etmenleri vardır.

Karışım Hazırlama

MIM hammaddesi (feedstock) mikro boyutta metal partikülleri ile başlar. Kalıplama için gerekli reolojik özellikler, kullanım için mekanik özellikler ve bağlayıcı giderme işlemini kolaylaştırmak için kimyasal ve fiziksel özellikler dikkate alınarak seçilen termoplastik ve metal tozları sıcak bir ortamda karıştırılırlar. Hem doğru bir toz, hem de doğru bağlayıcı seçimi maliyete ve sürece etkimektedir. Hazırlanan bu karışım daha sonra granülize edilerek hammadde (feedstock) elde edilir.



Şekil 3: Karışım Hazırlama

Kalıplama

Standart plastik enjeksiyon makineleri, Metal Enjeksiyon bileşenleri oluşturmak için kullanılır. Enjeksiyon işlemi yaklaşık 165–180 °C sıcaklıkta gerçekleştirilir ve tipik bir enjeksiyon çevrimi 20 saniyedir. Enjeksiyon işlemi ile "Yeşil Parça" adı verilen, metal ve plastik bağlayıcının bir arada bulunduğu ve henüz herhangi bir metalik bağlantı içermeyen, parçalar çekme payları da dikkate alınarak istenilen geometri ve biçimde şekillendirilir. Enjeksiyon sonrası parçaların gözle muayenesi yapılarak, ağırlık ve yoğunluk kontrolleri gerçekleştirilir.



Şekil 4: Kalıplama

Bağlayıcı Giderme

Bağlayıcı plastik maddeler yapıdan dikkatli bir şekilde uzaklaştırılır. Ayrıştırma adı verilen bu işlem iki aşamada gerçekleştirilir: Kimyasal ayrıştırma işleminde yağlar organik bir çözücü içerisinde (solvent) eritmek suretiyle yapıdan çıkarılır. Termal ayrıştırma işleminde ise termoplastik maddeler düşük sıcaklıktaki ön-sinterleme fırınlarında yakılmak suretiyle bertaraf edilir.



Şekil 5: Bağlayıcı Giderme

Sinterleme

Bağlayıcı kaldırıldıktan sonra parçalar, yüksek koruyucu bir ortamda yeterli bir sıcaklığa kadar toz parçacıkları arasında metalurjik bağ oluşturmak ve yoğunlaştırma oluşması için ısıtılır. Bu süreç genellikle katı hal difüzyonu ve / veya sıvı faz oluşumu dayanarak yoğunlaştırma sürecini gerçekleştirmektedir. Parçalar genellikle sinterleme sırasında kalıptaki boyutlarına göre % 15-20 arasında küçülürler ve sonunda elde edilen yoğunluk % 96-98 olmaktadır. Optimum sinterleme sıcaklığı malzemeye bağlı olarak değişmektedir. Tipik olarak demir esaslı malzemeler için bu değer 1200–1400 °C civarında olmaktadır.





Şekil 6: Sinterleme ve Sinter Sonrası Parça Görünümü

Sinterleme işlemi şu atmosferlerde yapılır :

- Azot gazı altında
- Hidrojen gazı altında
- Azot + Hidrojen gazı altında
- Vakum altında

3. METAL ENJEKSİYON KALIPLAMA (MIM) TEKNOLOJİSİNİN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

Avantajları

Tüketim mallarının ekonomik ömrü gittikçe kısalmaktadır. Saat, bilgisayar, cep telefonu gibi ürünlerde bu süre 6 aya kadar düşmüştür. Eskimiş ürünlerin yerine yenilerini sunmak kalıp imalatına sürekli ve büyük bir yatırım yapmayı gerektirmektedir. Hammaddede ise pahalı ve bulması zor bir kaynaktır. Talaşlı imalat özellikle küçük boyutlu ve hassas parçalar söz konusu olduğunda zor ve maliyetli bir yöntemdir. Yüksek bozuk oranı ve geri dönüşüm gücü dezavantaj teşkil etmektedir. Bu noktada MIM teknolojisinin göreceli olarak düşük sermaye ihtiyacı (basit olarak bir plastik enjeksiyon imalat atölyesinin gerektirdiği kadar) küçük ve hassas parçaların üretimi konusunda bu metodu çekici kılmaktadır, hatta tavsiye edilmektedir. MIM'in ikincil işlem gerektirmeyen (veya çok az gerektiren) bitmiş parça çıkarabilme kabiliyeti, talaşlı imalata yapılacak makine ve takım yatırımlarını ortadan kaldıracığı gibi, talaşlı işlem maliyetlerini de azaltacaktır. Kullanılan malzemenin neredeyse %100'ünden faydalanılması çevresel etkiler açısından da en az (veya hiç) malzeme ziyarı ve kirletici atık çıkmaması nedeniyle tercih edilmektedir. MIM parçalar genellikle malzeme özellikleri, yüzey kaliteleri, imalat toleransları ve seri üretime yakınlıkları bakımından üstün nitelikler göstermektedir.

MIM, yeni kalıp maliyetlerinin azaltılması veya

mevcut kalıpların yeni ürünlere adapte edilmek suretiyle fonksiyonelliklerinin uzatılması konusunda da avantajlara sahiptir. Kuşkusuz bu durum, tek bir kalıp seti kullanarak aynı malzemeden boyutları farklı ürünlerin elde edilebilmesi suretiyle sağlanabilecektir. Hatta aynı kalıp setinin farklı malzemelerden ancak birbirinin aynı parçaların üretilmesi için kullanılması faydayı daha da arttıracaktır. Örneğin plastik bir saat gövdesi üretmek için dizayn edilmiş bir kalıp seti, farklı büyüklüklerde paslanmaz çelik gövdeler imal etmek için de kullanılabilir (genç modeli, bayan ya da çocuk modelleri vs. gibi). Bu kalıp seti aynı zamanda farklı malzemelerden ancak aynı ölçülerde saat gövdesi imal etmek için de kullanılabilir (paslanmaz çelik, sert maden, titanyum, zirkonyum vs. gibi).

Kısacası MIM teknolojisinin avantajlarını şöyle sıralayabiliriz:

- Diğer üretim metodlarının maliyet baskısının müsaade etmediği, karmaşık şekilli parçaların üretimindeki özgürlük.
- Çok küçük boyutlu, fazla miktardaki parçanın seri üretimini mümkün kılar.
- Küçük çaplı delik, ince cidar ve hassas yüzey detayları bulunan ve hassas dökümle karşılanamayan özelliklere sahip parçaların üretilmesi.
- İç ve dış diş, profilli delik, çok hassas yüzey dokusu, yüzeyde tırtık, oyma ve markalama gibi net yüzey işlemleri sağlanabilir.
- Binlerce adet parçadan milyonlarca adet parça sayısına kadar üretim, hızlı ve verimli bir şekilde yapılabilir.
- Ulaşılan yüksek yoğunluk nedeniyle, geleneksel toz metalurjisi ve döküm teknikleriyle mukayese edildiğinde, yüksek mukavemet, manyetik ve korozyon dayanımı gibi üstün özelliklere ulaşılır.
- Süper alaşım, tungsten alaşımları ve titanyum gibi çok zor işlenen malzemelerden, istenen net şekilde parçaların üretilmesi.
- Homojen bir malzeme özelliği için izotropik ve düzgün bir malzeme mikro yapısı.
- Döküm ya da dövme metodu için uygun olmayan alaşımların kullanılabilme imkanı.
- Kritik ağırlık problemi olan uygulamalarda mühendislik yoğunluklu malzeme temin imkanı.

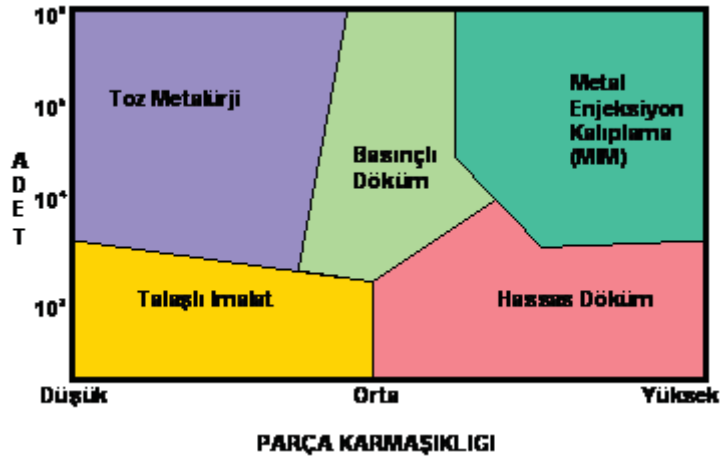
Dezavantajları

- Boyut – Genel olarak üretimi yapılabilecek parçanın ağırlığı 100 gramla sınırlanmıştır.
- Kesit Kalınlığı – Sinterleme sırasında çarpılmayı ve bağlayıcı giderme işlemi esnasında parçaya zarar gelmesini için engellemek için genellikle maksimum kesit kalınlığı 0,65 cm olmaktadır.
- Toleranslar – Genel olarak +/- yüzde 0,5, +/- 0,025 mm gibi çok küçük boyut toleransları olmaktadır. Daha kalın toleranslar, ikincil işleme veya aşındırma gerektirmektedir.
- Üretim Hacmi – 10000'den fazla parçanın işleme maliyeti genellikle yıllık üretim hacminin ekonomisiyle sınırlanmaktadır.

MIM ve Diğer Teknolojiler:

Metal enjeksiyon kalıplama (MIM) teknolojisi, aslında karmaşık şekilli parçaları yüksek miktarlarda üretmeye yarayan bir teknolojidir. Genel olarak konvansiyonel presleme ve sinterleme işlemleri bu parçaların üretimi için pahalı olsa da, üretilmesi düşünülen karmaşık şekilli parçaların miktarı arttıkça, MIM teknolojisi metal işleme gibi tekniklere göre oldukça ucuzdur. Örnek vermek gerekirse, 4,5 gram ağırlığındaki bir MIM parçasının 250 000 adet üretimde birim maliyeti 1,4 USD iken, 3 000 000 adet ve üstü üretimde birim maliyet 0,2 USD olmaktadır.

Aşağıdaki şekillerde (Şekil 7 ve Şekil 8) imalat teknolojilerinin parça karmaşıklığı ve üretim miktarı parametreleri açısından uygulama alanları ve bu imalat teknolojilerinin çeşitli parametreler açısından kıyaslanması verilmektedir. Metal enjeksiyon kalıplama teknolojisi, hassas döküm ile bir çok noktada eşit üretim sürecinde olsalar da yüksek miktarlarda üretimde ve dökülemeyen alaşımların üretiminde metal enjeksiyon kalıplama teknolojisinin çok kesin bir üstünlüğü vardır.



Şekil 7: İmalat Teknolojilerinin Parça Karmaşıklığı ve Üretim Miktarı Parametreleri Açısından Uygulama Alanları

Tablo 1: İmalat Teknolojilerinin Çeşitli Parametreler Açısından Kıyaslanması

Karakteristik	MIM	Hassas Döküm	Geleneksel Toz Metalürji	Talaşlı İmalat
Yoğunluk	97%	100%	85%	100%
Uzama	Yüksek	Orta	Düşük	Yüksek
Çekme mukavemeti	Yüksek	Yüksek	Düşük	Yüksek
Sertlik	Yüksek	Yüksek	Düşük	Yüksek
Karmaşık parça üretim kabiliyeti	Yüksek	Orta	Düşük	Orta
Yüzey kalitesi	Yüksek	Orta	Orta	Yüksek
Maliyet	Düşük	Orta	Düşük	Yüksek
Üretim miktarı	Yüksek	Orta	Orta	Düşük

4. SONUÇ

Görece küçük (minyatürize), karmaşık şekilli (karmaşık), dar imalat toleranslarına sahip (hassas) parçaların, yüksek mekanik özelliklere sahip metal malzemelerden kaliteli bir biçimde ve büyük miktarlarda üretilmesi, henüz emekleme safhasında bulunan ancak geleceğin imalat teknolojisi olarak gösterilen Metal Enjeksiyon Kalıplama – MIM yöntemi ile yapılmaktadır. Dizayn mühendislerine klasik imalat metodlarının ötesinde imkânlar sunan MIM, tasarım ve üretimde sınırların zorlanmasına neden olmaktadır. Üretimi yapılabilecek malzeme sayısı oldukça geniş olup karmaşık şekilli hassas parçaların üretimi bu yöntemle kolaylıkla sağlanabilmektedir.

MIM Teknolojisinde Kullanılan Bazı Malzemeler:

Paslanmaz Çelikler:

- AISI 316L (DIN 1.4436) > Fe-17Cr-12Ni-2Mo-2Mn
- AISI 316L Dupleks (DIN 1.4404) > Fe-21Cr-9Ni-3Mo-2Mn
- AISI 304L (DIN 1.4306) > Fe-18Cr-8Ni
- AISI 410L > Fe-11Cr-0.5C
- AISI 420 (DIN 1.4021) > Fe-13Cr-1Mn-1Si
- AISI 430 (DIN 1.4016) > Fe-17Cr-1Mn-1Si-1Ni
- AISI 440C (DIN 1.4125) > Fe-17Cr-1Ni-1C
- AISI 17-4PH (DIN 1.4542, 1.4548) > Fe-16Cr-4Ni-4Cu

Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli Çelikler:

- AISI 4340 (DIN 1.6565) > Fe-2Cr-1Ni-1Mn-0.4C
- AISI 4140 (DIN 1.7225) > Fe-1Cr-0.4C
- AISI H13 (DIN 1.2344)
- AISI 4640 > Fe-2Ni-1Mo-0.4C
- 1020 > Fe-0.2C

Sementasyon Çelikleri:

- 7% Ni-Fe > Fe-7Ni-0.5C
- 2% Ni-Fe > Fe-2Ni-0.5C
- AISI 8620 > (DIN 1.6543, 1.6526)

Yumuşak Manyetik Malzemeler:

- 2% Ni-Fe > Fe-2Ni-0.5C
- 40% Ni-Fe > Fe-40Ni
- 50% Ni-Fe > (DIN 1.3927) Fe-50Ni
- 80% Ni-Fe > Ni-20Fe
- 3% Si-Fe > Fe-3Si
- 7% Si-Fe > Fe-7Si
- Iron > Fe
- 2V Permendur

Yüksek Alaşımli Özel Malzemeler:

- 36% Ni-Fe (Invar) > Fe-36Ni
- 32% Ni-Fe (Süper Invar) > Fe-32Ni-5Co
- 42% Ni-Fe
- ASTM F 15 (Kovar) > Fe-29Ni-17Co
- Stellite > Co-28Cr-4W-3Ni-1C
- Inconel 718 > Ni-19Cr-18Fe-5Nb-3Mo-1Ti-0.4Al
- Takım Çeliği > Fe-6W-5Mo-4Cr-2V-1C
- Udimet 700 > Ni-18Co-15Cr-5Mo-4Al-3Ti
- Hastelloy > Ni-28Mo-2Fe
- Süper alaşım > Nb-10W-10Ta

Diğer Malzemeler:

- Bakır > Cu
- Pirinç (Ms58) > Cu-Zn-Pb
- Titanyum > Ti
- Ti-6-4 > Ti-6Al-4V
- Altın (18 ayar) > 75Au-12.5Ag-12.5Cu
- Ağır Alaşımlar > W-8Mo-8Ni-2Fe, W-5Ni-2Cu
- Sert Maden (Tungsten karbür) > WC-10Co

5.KAYNAKLAR

1. R.M. German, Injection Molding of Metals and Ceramics, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, 1997.
2. A. Bose, The Technology and Commercial Status of Powder Injection Molding, Journal of Metals, 1995, vol. 47, no. 8, pages 26 – 30.
3. SSI Technologies Inc, Metal Injection Molding Processing, 3330 Palmer Drive Janesville, Wisconsin, 53546 United States, 2008
4. R.M. German, çev. S. Sarıtaş, M.Türker, N. Durlu, Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşleme, Türk Toz Metalurjisi Derneği
5. Üretim Raporları, BİLSA Kalıp San. Ve Tic. Ltd. Şti.