

TOZ METALURJİSİ (T/M)

- Mühendislik tozlarının karakterizasyonu
- Metalsel tozların üretimi
- Geleneksel presleme ve sinterleme
- Alternatif presleme ve sinterleme teknikleri
- T/M için malzemeler ve ürünler
- Toz metalurjisinde tasarım kuralları

1

Toz Metalurjisi (T/M)

- Parçaların metal tozlarından imal edildiği metal işleme teknolojisi
- Geleneksel T/M imalat sırası olarak, tozlar istenen şekle preslenir ve daha sonra, sert, rijit bir kütle halinde bağlanmak üzere sinterlenir
 - *Presleme* imal edilecek parça için özel olarak tasarlanmış *zımba ve kalıp* kullanarak pres tipi bir makinede gerçekleştirilir
 - *Sinterleme* metalin erime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta yapılır

2

Toz Metalurjisi Niçin Önemlidir?

- T/M parçaları sonraki talaşlı işlemlere ihtiyacı ortadan kaldıracak olan, *son şekil veya son şekle yakın* olarak seri üretilebilir
- T/M işlemleri çok az malzeme ziyan eder – başlangıç tozunun yaklaşık % 97'si mamule dönüştürülür
- T/M parçaları gözenekli metal parçaları imal etmek için belirli bir gözeneklilik seviyesinde yapılabilir
 - Örnekler: filtreler, yağ-empirilen yataklar ve dişliler

3

T/M'nin Önemini Gösteren Diğer Nedenler

- Diğer yöntemlerle işlenmesi zor bazı metaller toz metalurjisiyle şekillendirilebilir
 - Örnek: Ampullerdeki Tungsten filamentler T/M ile yapılır
- T/M ile yapılan belirli alaşım kombinasyonları ve sermetler, başka bir yöntemle imal edilemez
- T/M, boyut kontrolü bakımından çoğu döküm yönteminden daha üstündür
- T/M imalat yöntemleri ekonomik üretim için otomatize edilebilir

4

T/M İşlemenin Sınırlılıkları ve Zayıf Yönleri

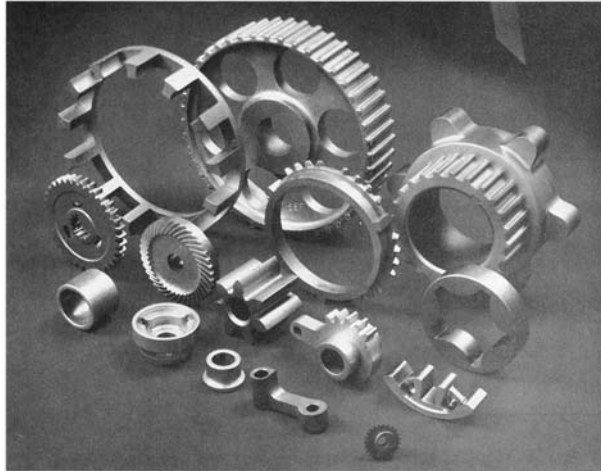
- Yüksek takım ve ekipman maliyetleri
- Metal tozları pahalıdır
- Metal tozlarının depolama ve nakliyle ilgili problemler
 - Örnekler: zamanla bozulma, belirli metallerde yangın hasarı
- Metal tozlarının presleme sırasında kalıp içinde paralel olarak akmaması nedeniyle parça geometrisinde sınırlamalar
- Parça boyunca yoğunluktaki değişimler, özellikle karmaşık geometriler için bir sorun olabilir

5

T/M Parça Malzemeleri

- En büyük tonajlı malzemeler demir, çelik ve alüminyumdur
- Diğer T/M metalleri olarak bakır, nikel ve molibden ve tungsten gibi refrakter metaller sayılabilir
- Tungsten karbür gibi metal karbürler de toz metalurjisinde oldukça fazla miktarda tüketilmektedir

6



Şekil 16.1 - Toz metalurjisi parçalara örnekler (Dorst America, Inc.'in izniyle)

7

Mühendislik Tozları

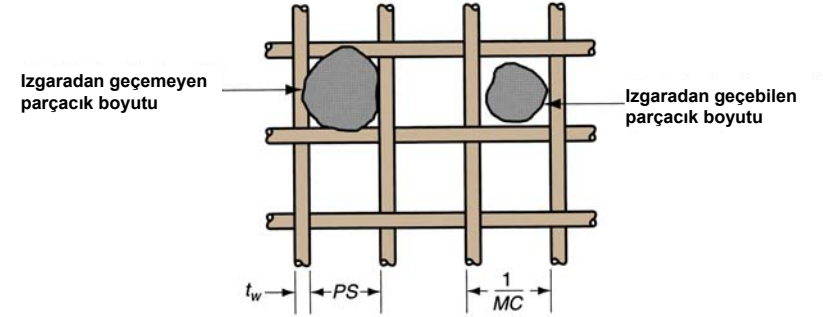
- Bir toz, çok ince bölünmüş taneli katı olarak tanımlanabilir
- Mühendislik tozları, metaller ve seramiklerdir
 - Mühendislik tozlarının geometrik özellikleri:
 - Parçacık boyutu ve dağılımı
 - Parçacık şekli ve iç yapısı
 - Yüzey alanı

8

Parçacık Boyutunun Ölçümü

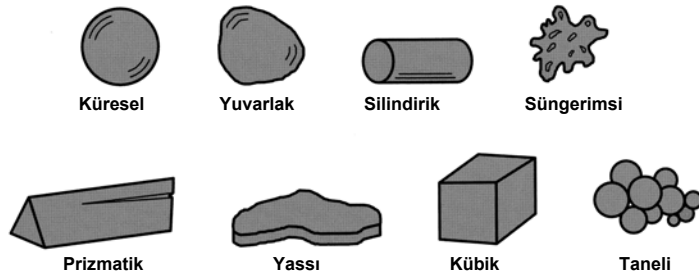
- En yaygın yöntemler, farklı ızgara boyutlarında elekler kullanır
- *Izgara numarası* – eleğin doğrusal 1 inç'i başına delik sayısını gösterir
 - 200 olan bir ızgara numarası doğrusal inç başına 200 delik olduğu anlamına gelir
 - Izgara kare şeklinde olduğundan, her iki yönde de aynı numara olur ve inç başına toplam delik sayısı $200^2 = 40,000$ 'dir.
 - Daha yüksek ızgara numarası, daha küçük parçacık boyutu anlamına gelir

9



Şekil 16.2 - Parçacık boyutunun belirlenmesi için ızgara eleği

10



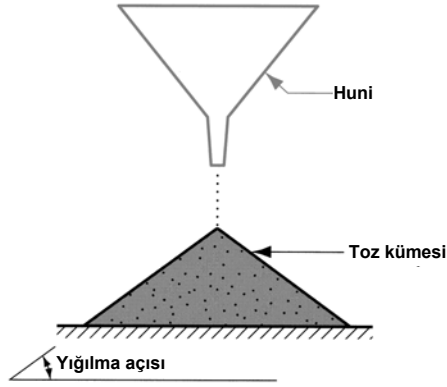
Şekil 16.3 - Toz metalurjisindeki muhtemel (ideal) parçacık şekillerinin türleri

11

Parçacıklar Arası Sürtünme ve Akış Karakteristikleri

- Parçacıklar arasındaki sürtünme, bir tozun akış kolaylığını ve paket sıkılığını etkiler
- Parçacıklar arası sürtünmenin yaygın bir testi, bir toz kümesinin dar bir huniden dökülürken oluşturduğu *yığılma açısı*'dir.

12



Şekil 16.4 - Dar bir huniden dökülen toz kümesinin yığılma açısıyla gösterilen parçacıklar arası sürtünme. Büyük açılar, büyük parçacıklar arası sürtünmeyi gösterir.

13

Gözlemler

- Daha küçük parçacık boyutları genel olarak daha büyük sürtünme ve daha dik açılar gösterir
- Küresel şekiller en düşük parçacıklararası sürtünmeye sahiptir
- Şekil küreselden saptıkça, parçacıklararası sürtünme de artma eğilimine girer

14

Parçacık Yoğunluğunun Ölçümleri

- *Gerçek yoğunluk* – malzemenin gerçek hacminin yoğunluğu
 - Tozların katı bir kütle haline eritilmesi durumundaki malzeme yoğunluğu
- *Kütle yoğunluğu* – tozların döküldükten sonra gevşek durumdaki yoğunluğu
 - Parçacıklar arasındaki gözenekler nedeniyle kütle yoğunluğu gerçek yoğunluktan daha düşüktür

15

Paketleme Faktörü = Kütle Yoğunluğu / Gerçek Yoğunluk

- Gevşek tozların tipik değerleri 0,5 ve 0,7 arasındadır
- Eğer farklı toz boyutları varsa, daha küçük olan tozlar daha büyük olanların ara boşluklarına yerleşerek havanın uzaklaşmasını sağlar ve daha yüksek paketleme faktörüne neden olur
- Paketleme, tozları titreştirerek, daha sıkı yerleşmelerinin sağlanmasıyla artırılabilir.
- Sıkıştırma sırasında uygulanan basınç, tozları yeniden düzenleyerek ve parçacıkları deforme ederek tozların paketlenmesini artırır

16

Gözeneklilik

Tozların içindeki gözenek hacminin (boş yerler) kütle hacmine oranı

- Prensip olarak, Gözeneklilik + Paketleme faktörü = 1.0
- Bu durum, parçacıkların bazılarında kapalı gözeneklerin muhtemel varlığı nedeniyle karmaşılaşır
- Eğer iç gözenek hacimleri yukarıdaki gözenekliliğe eklenirse, eşitlik tam olur

17

Kimyasal Bileşimi ve Yüzey Filmleri

- Metalsel tozlar aşağıdaki gibi sınıflandırılır
 - *Elementer* – bir saf metalin varlığı
 - *Ön-alaşımlanmış* – her bir parçacık bir alaşımdır
- Muhtemel yüzey filmleri arasında, oksitler, silikatlar, absorbe edilmiş organik malzemeler ve nem bulunur
 - Kural olarak, bu filmlerin, şekillendirme işleminden önce uzaklaştırılmaları gerekir

18

Metalsel Tozların Üretimi

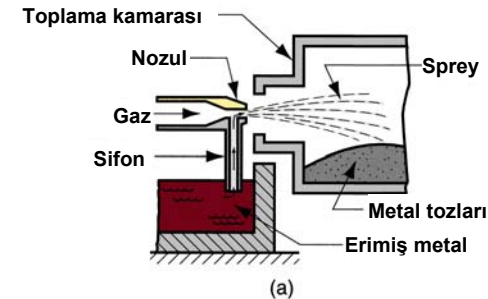
- Genel olarak metalsel tozların üreticileri, bunlardan T/M parçaları yapan firmalarla aynı değildir
- Teorik olarak herhangi bir metal, toz haline dönüştürülebilir
- Metalsel tozların üretildiği üç temel yöntem:
 1. Atomizasyon
 2. Kimyasal
 3. Elektrolitik'tir
- Ek olarak, mekanik yöntemler yerine göre toz boyutlarını küçültmekte kullanılmaktadır

19

Gaz Atomizasyon Yöntemi

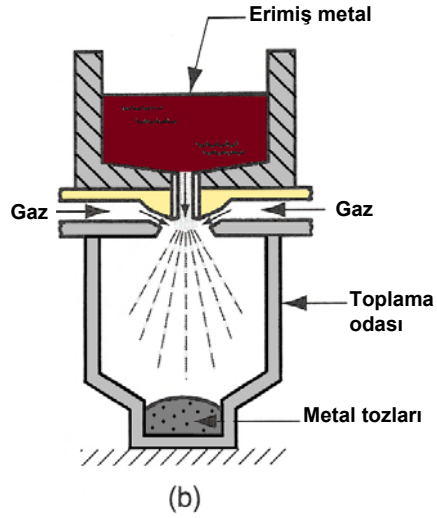
Yüksek hızlı gaz jeti, erimiş metali aşağıdan emen (sifon) ve bir kap içine püskürten bir genişleme nozulu içinden akar

- Damlacıklar toz halinde katılaşır



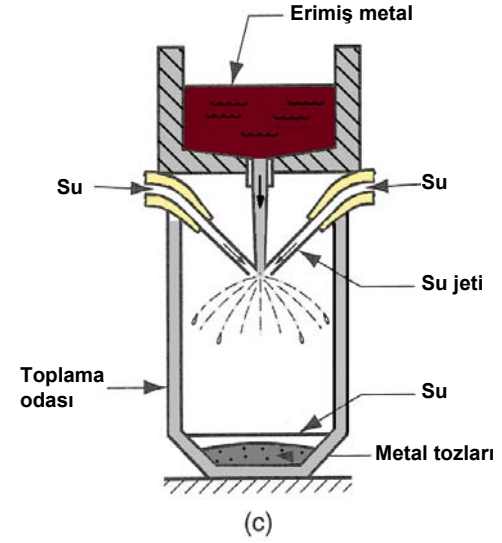
Şekil 16.5 (a) gaz atomizasyon yöntemi

20



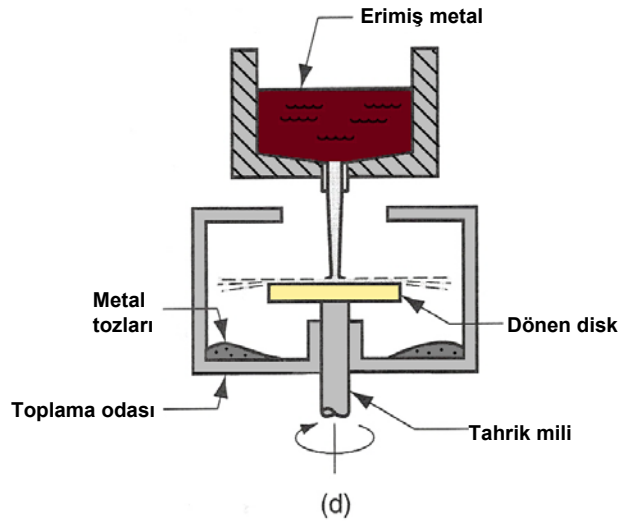
Şekil 16.5 (b) diğer bir gaz atomizasyon yöntemi

21



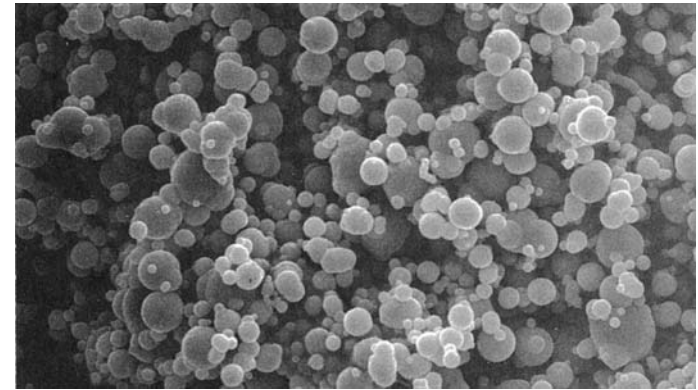
Şekil 16.5 (c) su atomizasyonu

22



Şekil 16.5 (d) dönen disk ile savurma atomizasyon yöntemi

23



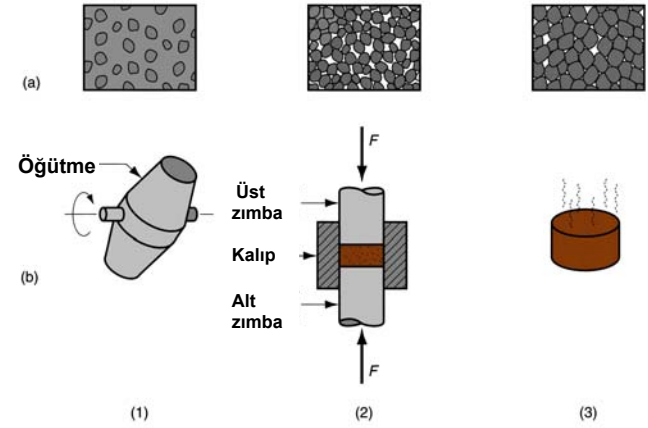
Şekil 16.6 - Demir pentakarbonil'in ayrıştırılmasıyla üretilen demir tozları; parçacık boyutları 0.25 - 3.0 mikron arasındadır (GAF Chemicals Corporation'ın izniyle)

24

Geleneksel Presleme ve Sinterleme

- Metalsel tozlar üretildikten sonra, geleneksel T/M sırası üç aşamadan oluşur:
 - Tozların *öğütülmesi ve karıştırılması*
 - Sıkıştırma* – istenen parça şekline presleme
 - Sinterleme* – parçacıkların katı hal bağını sağlamak ve parçanın dayanımını arttırmak için erime sıcaklığının altına ısıtma
- Ek olarak, bazen boyutsal doğruluğu iyileştirmek, yoğunluğu arttırmak ve diğer nedenlerle ikincil işlemler uygulanır

25



Şekil 16.7 - Geleneksel toz metalurjisi üretim sırası: (1) öğütme, (2) sıkıştırma, ve (3) sinterleme; (a) parçacıkların durumu (b) üretim sırasında işlemi ve/veya parçayı göstermektedir

26

Tozların Öğütülmesi ve Karıştırılması

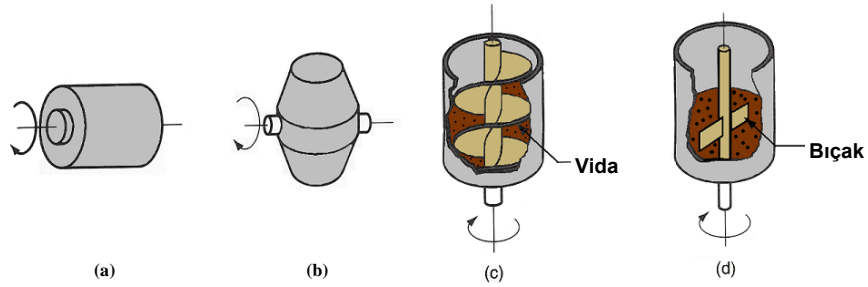
- Sıkıştırma ve sinterlemede başarılı sonuçlar için, başlangıç tozları homojen olmalıdır
- Öğütme* – aynı kimyasal bileşimde ancak farklı parçacık boyutlarındaki tozlar birbirine benzetilir
 - Farklı parçacık boyutları çoğu kez gözenekliliği azaltmak için öğütülür
- Karıştırma* – farklı kimyasal bileşimdeki tozlar birbiriyle karıştırılır
 - T/M teknolojisi, değişik metallere, diğer yöntemlerle imal edilmeleri çok zor hatta olanaksız olan alaşımlarla karışmasını sağlar

27

Sıkıştırma

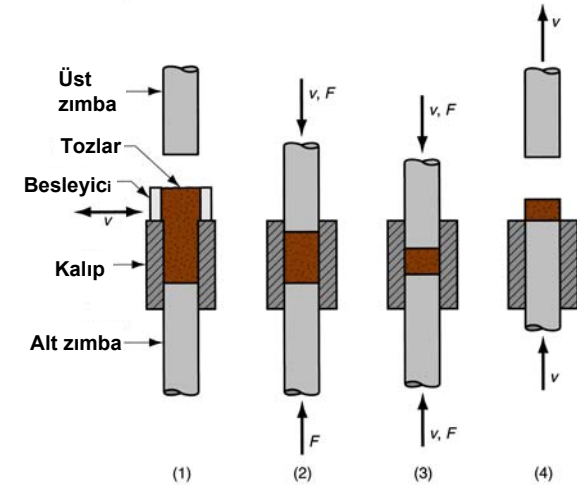
- Tozları istenen şekle dönüştürmek için yüksek basınç uygulama
- Geleneksel sıkıştırma yöntemi, zıt yönlü zımbaların tozları bir kalıp içinde sıkıştırdığı *presleme*'dir
 - Sıkıştırıldıktan sonraki parça *ıslak sıkıştırma* olarak adlandırılır; buradaki *ıslak* terimi, henüz yeterince sıkıştırılmamış anlamındadır
 - Sıkıştırıldığında parçanın *ıslak* dayanımı, taşımak için yeterli ancak sinterlemeden sonraki değerinden çok uzaktır

28



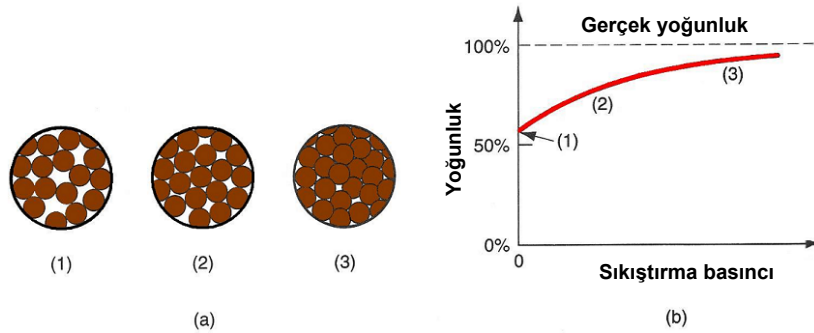
Şekil 16.8 - Değişik öğütme ve karıştırma makinaları: (a) dönen tambur, (b) dönen çift koni; (c) vidalı mikser; ve (d) bıçaklı mikser

29



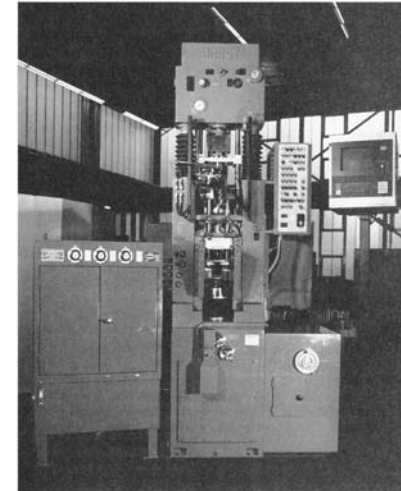
Şekil 16.9 - T/M'de presleme: (1) kalıbın otomatik besleyici tarafından tozla doldurulması; (2) presleme sırasında alt ve üst zımbaların ilk ve (3) son durumları, ve (4) parçanın çıkarılması

30



Şekil 16.10 - (a) Sıkıştırma sırasında uygulanan basıncın etkisi (1) doldurmadan sonraki gevşek tozlar; (2) yeniden paketleme; ve (3) parçacıkların deformasyonu; ve (b) tozların yoğunluğunun, basınca bağlı olarak değişimi. Buradaki sıralama, Şekil 16.9'daki (1), (2) ve (3) aşamalarına karşı gelmektedir.

31



Şekil 16.11 - Toz metalurjisi parçalarını sıkıştırmak için bir 450 kN (50-ton) hidrolik pres. Bu pres, karmaşık T/M parçalarını imal etmek için çoklu seviyeleri çalıştırma kapasitesine sahiptir (Dorst America, Inc.'in izniyle).

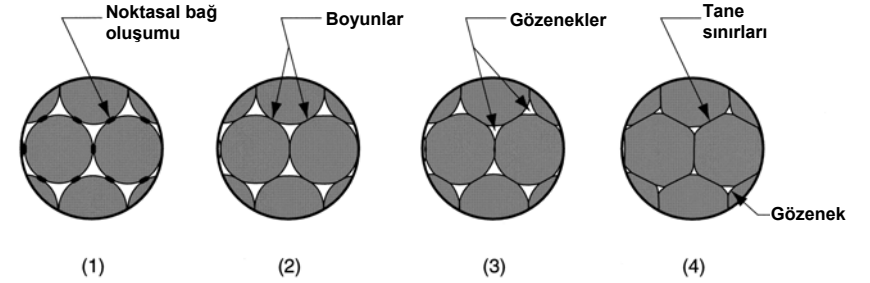
32

Sinterleme

Metalsel parçacıkların dayanımını ve sertliğini arttırmak için bağ oluşturma ısıl işlemi

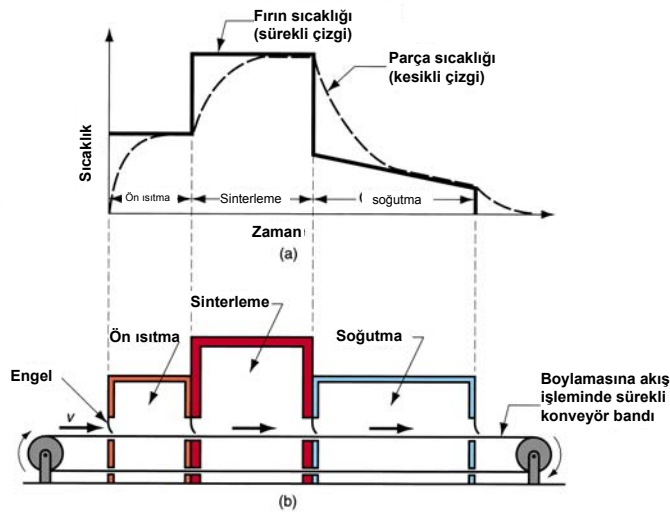
- Genellikle metalin erime sıcaklığının % 70'i ve % 90'ı arasında yapılır (mutlak sıcaklık cinsinden)
- Araştırmacılar arasındaki ortak kana göre sinterlemenin birincil derecede etkin kuvveti, yüzey enerjisinin azaltılmasıdır
- Sinterleme sırasında, gözenek boyutları azaldığından, parçada büzülme oluşur

33



Şekil 16.12 - Mikroskopik ölçekte sinterleme: (1) parçacık bağları, temas noktalarında başlar; (2) temas noktaları "boyun" halinde büyür; (3) parçacıklar arasındaki gözenekler, boyut olarak küçülür; ve (4) boyun oluşan bölgelerde tane sınırları oluşur

34



Şekil 16.13 - (a) Sinterlemede tipik ısıl işlem çevrimi; ve (b) Bir sürekli sinterleme fırınının şematik enkesiti

35

Yoğunlaştırma ve Boyutlandırma

Sinterlenmiş parçanın yoğunluğunu arttırmak, doğruluğunu iyileştirmek veya ilave şekil vermek için ikincil işlemler uygulanır

- *Yeniden presleme* – sinterlenmiş parçayı, yoğunluğunu arttırmak ve özelliklerini iyileştirmek için kapalı bir kalıpta presleme
- *Boyutlandırma* – sinterlenmiş bir parçanın boyutsal doğruluğunu arttırmak için presleme
- *Kabartma* – sinterlenmiş bir parça üzerinde yüzeyindeki ayrıntıları güçlendirmek için presleme
- *Talaşlı işleme* – diş, kenar delikleri veya diğer ayrıntılar gibi preslemeyle oluşturulamayan geometrik özelliklerin kazandırılması

36

Emprenye ve Gözenek Doldurma

- Gözeneklilik, T/M teknolojisinin ayrılmaz ve doğal bir karakteristiğidir
- Bulunan gözenekleri yağ, polimer veya metalle doldurarak özel mamuller oluşturulabilir
- İki kategori:
 1. Emprenye
 2. İnfiltrasyon

37

Emprenye İşlemi

- Sinterlenmiş bir T/M parçanın gözeneklerine, yağ veya başka bir sıvı emdirilmesini tanımlayan terim
- Yaygın mamuller, yağ emdirilmiş yataklar, dişliler ve benzer parçalardır
 - Alternatif bir uygulama, parçalara polimer reçine emdirilerek, gözenek boşluklarının sıvı formda doldurulması ve katılaştıktan sonra basınç altında sızdırmazlık özelliğine sahip bir parça elde edilmesidir

38

İnfiltrasyon

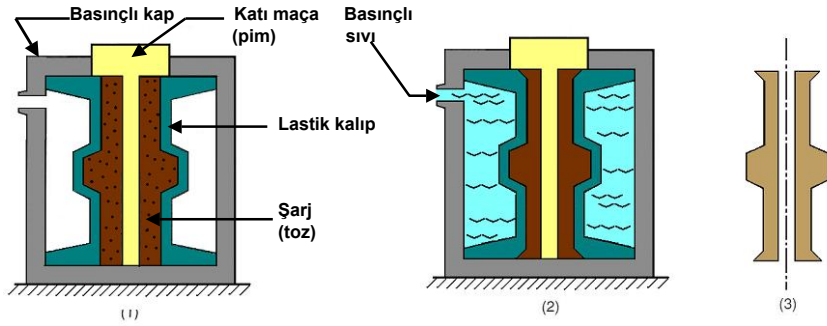
- T/M parçanın gözeneklerinin erimiş bir metalle doldurulması işlemi
- Dolgu metalinin erime sıcaklığı, T/M parçanınkinin altında olmalıdır
 - Sinterlenmiş parça ile temas halindeki dolgu metalinin ısıtılmasını ve dolgunun kapiler etkiyle gözeneklere dolmasını içerir
 - Oluşan yapı, göreceli olarak gözeneksizdir ve infiltre edilmiş parça daha üniform bir gözenekliliğe sahip olup tokluğu ve dayanımı artmıştır

39

Alternatif Presleme ve Sinterleme Teknikleri

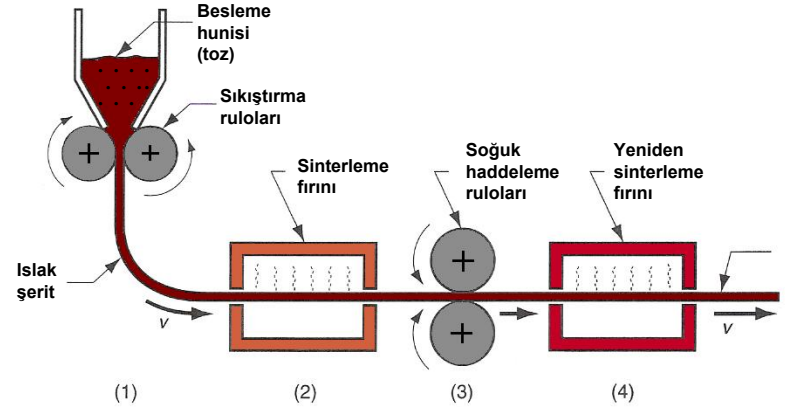
- Geleneksel pres ve sinter sırası, toz metalurjisinde en yaygın kullanılan şekillendirme teknolojisidir
- T/M parçalar için ilave yöntemler şunlardır:
 - İzostatik presleme (Soğuk=CIP ve Sıcak=HIP)
 - Toz enjeksiyon kalıplama
 - Toz haddeleme, Ekstrüzyon ve Dövme
 - Kombine presleme ve sinterleme
 - Sıcak presleme
 - Kıvılcım sinterleme
 - Sıvı faz sinterleme (Erime sıcaklıkları farklı iki tür tozun karıştırılması ve tozlardan birinin eritilmesi)

40



Şekil 16.14 - Soğuk izostatik presleme (1) tozlar esnek bir kalıp içine yerleştirilir; (2) tozları sıkıştırmak için kalıba doğru hidrostatik basınç uygulanır; ve (3) basınç kaldırılır ve parça çıkarılır

41



Şekil 16.15 - Toz haddeleme: (1) tozlar, bir ıslak şerit oluşturmak üzere sıkıştırma ruloları arasından beslenir; (2) sinterlenir; (3) soğuk haddelenir; ve (4) tekrar sinterlenir

42

T/M İçin Malzeme ve Ürünler

- T/M için hammaddeler, diğer metal işlemler için kullanılanlardan daha pahalıdır; çünkü metali toz haline getirmek için ilave enerji gerekir
- Bu nedenle, T/M ancak belirli uygulama alanları için rekabetçidir
- Toz metalurjisine en uygun görünen malzemeler ve ürünler nelerdir?

43

T/M Malzemeleri – Elemanter Tozlar

Parçacık halindeki bir saf metal

- Yüksek saflığın önemli olduğu yerlerde kullanılır
- Yaygın elemanter tozlar:
 - Demir
 - Alüminyum
 - Bakır'dır
- Elemanter tozlar, geleneksel yöntemlerle formülasyonu zor olan özel alaşımları elde etmek üzere diğer metal tozlarıyla da karıştırılmaktadır
 - Örnek: takım çelikleri

44

T/M Malzemeleri – Ön-alaşımli Tozlar

Her bir parçacık, istenen kimyasal bileşime sahip bir alaşımdır

- Elemanter tozların karıştırılmasıyla formüle edilemeyen alaşımlar için kullanılır
- Yaygın ön-alaşımli tozlar:
 - Paslanmaz çelikler
 - Belirli bakır alaşımları
 - Yüksek hız çeliği

45

T/M Ürünler

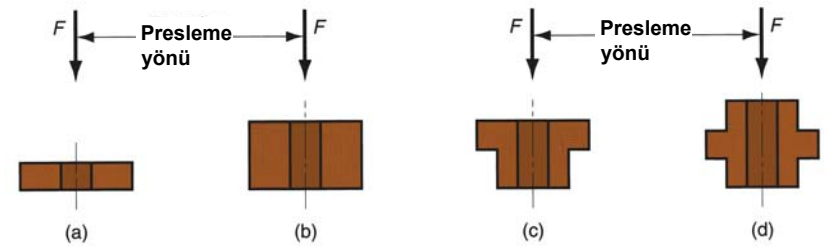
- Dişliler, yataklar, sprockets, tespit elemanları, elektrik kontakları, kesici takımlar ve değişik makine parçaları
- T/M'nin üstünlükleri: parçalar son şeklinde veya son şekline yakın oluşturulabilirler
 - T/M işleminden sonra hiç veya çok az ilave işlem gerektirirler
- Büyük miktarlarda üretileceklerinde, dişliler ve yataklar T/M için idealdir zira:
 - Geometri iki boyutlu olarak belirlenir
 - Parçada yağlama için rezervuar olarak hizmet verecek gözenekliliğe ihtiyaç vardır

46

T/M Parçalarını Sınıflandırma Sistemi

- Metal Tozları Endüstrileri Federasyonu (MPIF), toz metalurjisi parça tasarımı için geleneksel preslemedeki zorluk seviyesine göre dört sınıf tanımlar
- Bu sınıflandırma, geleneksel T/M işlemle ulaşılabilecek şekil sınırlamalarının bazılarını gösterdiğinden faydalıdır

47



Şekil 16.16 - T/M parçaların dört sınıfı (yandan görünüşleriyle; enkesitleri daireseldir): (a) Sınıf I - tek yönde preslenen basit ince şekiller; (b) Sınıf II - iki yönde presleme gerektiren basit ancak kalın şekiller; (c) Sınıf III - iki yönde preslenen iki kalınlık seviyesi; ve (d) Sınıf IV - her bir seviyenin ayrı kontrol edilmesi gereken, iki yönde preslenen farklı kalınlık seviyeleri

48

T/M Parçalar için Tasarım Kılavuzları - I

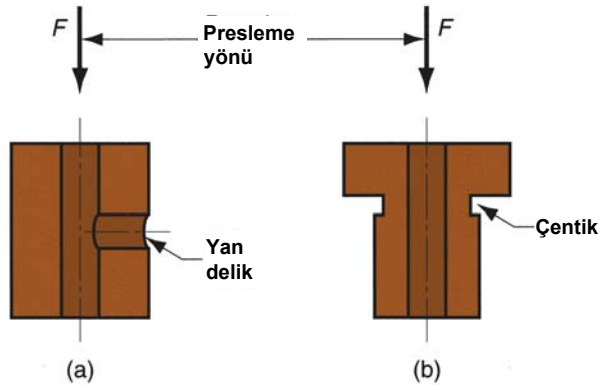
- İşlem ekonomisi, ekipman ve özel takımların maliyetinin karşılanabilmesi için genellikle büyük miktarlar gerektirir
 - Minimum parça sayısı olarak 10,000 birim önerilir
- T/M, parçalarda kontrollü gözenek seviyesi oluşturma kapasitesi bakımından rakipsizdir
 - % 50'ye yakın gözeneklilik mümkündür
- T/M, her türlü metal veya alaşımı kullanarak üretim yapabilir - diğer yöntemlerle üretilmeleri olanaksız değilse bile, zor olabilecek malzemeler

49

T/M Parçalar için Tasarım Kılavuzları - II

- Parça geometrisi, preslemeden sonra kalıptan çıkarılabilir
 - Bu genel olarak parçanın, kademeli olanlara izin verilmesine rağmen, dikey veya dikeye yakın kenarlar sahip olması gerektiği anlamına gelir
 - Parça kenarındaki delik veya çentik gibi tasarım özelliklerinden kaçınılmalıdır
 - Çıkarma sırasında sorun olmayacağından, dikey çentiklere ve deliklere izin verilebilir
 - Dikey delikler tüm enkesitte olmalıdır; aksi halde özel işlem yapmadan oluşturulmasında zorluk çıkar

50



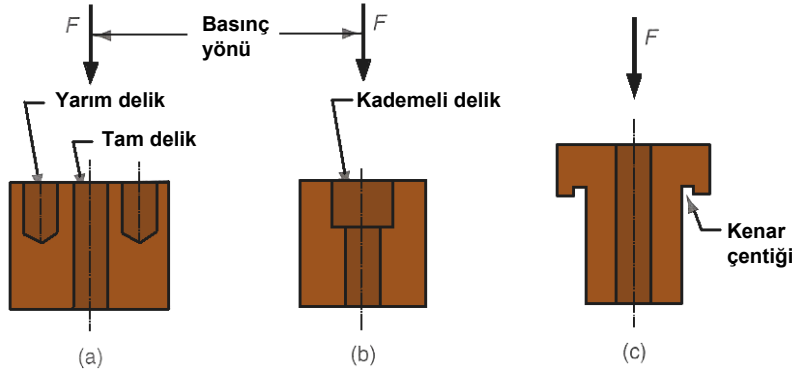
Şekil 16.17 - T/M'de kaçınılması gereken parça özellikleri: parçanın çıkarılmasını olanaksızlaştıran yan delikler ve (b) yan çentikler

51

T/M Parçalar için Tasarım Kılavuzları - III

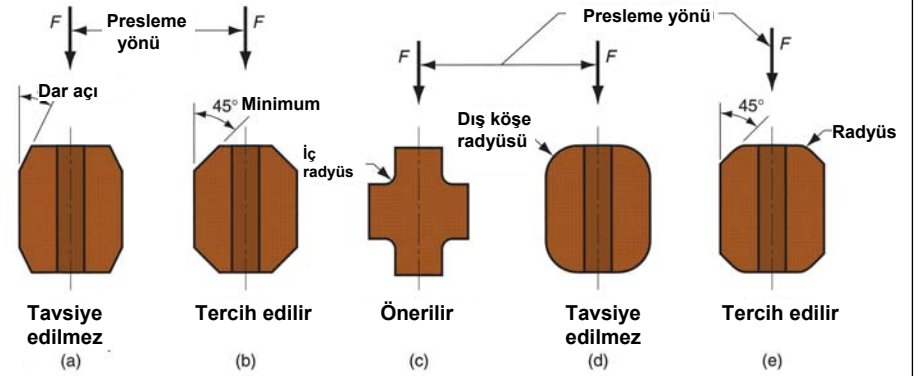
- Vida dişleri, T/M ile oluşturulamaz; eğer gerekiyorsa, parça içinden talaş kaldırarak oluşturulmalıdır
- Pah kırma ve köşe yuvarlatmalar (radyüsler) T/M presleme ile mümkündür; ancak açılar çok darsa, zımba rijitliği bakımından sorunlar çıkabilir
- Delikler arasında veya bir delik ile dış cidar arasındaki kalınlık en az 1,5 mm olmalıdır
- En düşük tavsiye edilen delik çapı 1,5 mm'dir

52



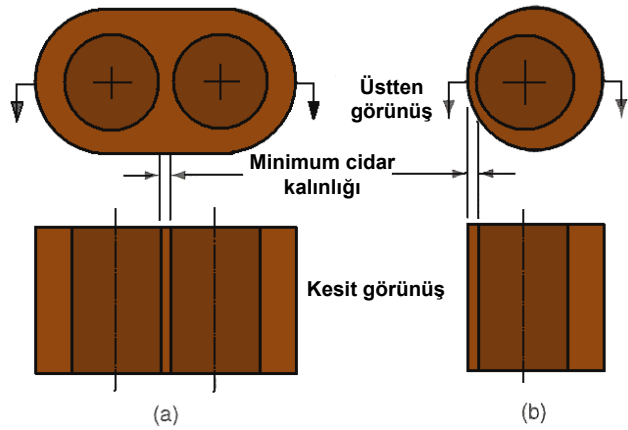
Şekil 16.18 - T/M'de izin verilen parça özellikleri: (a) dikey delik, yarım ve tam; (b) dikey kademeli delik; ve (c) dikey yönde kenar çentiği. Bu özellikler, parçanın çıkarılmasına izin verir.

53



Şekil 16.19 - Pah kırmalar ve köşe radyüsleri yapılabilir ancak kesin kurallara uyulmalıdır: (a) dar açılardan kaçınınız; (b) zımba rijitliği için geniş açılar tercih edilir; (c) iç radyüsler istenebilir; (d) zımba kenarda kırılacağından dolayı tüm çevrede köşe radyüslerinden kaçınınız; (e) problem, radyüslerle pah kırmalar birleştirilerek çözülmüştür

54



Şekil 16.20 - Tavsiye edilen minimum cidar kalınlıkları 1,5 mm'yi aşmamalıdır: (a) delikler arasındaki görünüş; veya (b) bir delik ile bir dış cidar arasındaki görünüş.

55