

**EKSTRÜZYONLA TAM YOĞUNLAŞTIRILMIŞ
PÜSKÜRTME ŞEKİLLENDİRME ALUMİNYUMUN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Alparslan Afşin EKİCİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2006
ANKARA**

Alparslan Afşin EKİCİ tarafından hazırlanan EKSTRÜZYONLA TAM YOĞUNLAŞTIRILMIŞ PÜSKÜRTME ŞEKİLLENDİRME ALUMİNYUMUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. İbrahim USLAN
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : Prof. Dr. Bedri TUÇ

Üye : Prof. Dr. Süleyman SARITAŞ (TOBB-ETÜ)

Üye : Doç. Dr. Mustafa ÜBEYLİ (TOBB-ETÜ)

Üye : Yrd. Doç.Dr. İbrahim USLAN (Danışman)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Nihat GEMALMAYAN

Tarih : 22.06.2006

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Alparslan Afşin EKİCİ

**EKSTRÜZYONLA TAM YOĞUNLAŞTIRILMIŞ
PÜSKÜRTME ŞEKİLENDİRME ALUMİNYUMUN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)**

Alparslan Afşin EKİCİ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2006**

ÖZET

Toz metalurjisi tekniklerinden biri olan Püskürtme Şekillendirme (PŞ) ile, gözenek miktarı az, tane boyutu küçük ve yüksek mukavemetli parçalar üretilmektedir. Ekstrüzyon ise toz metal parçalarda gözenek kapatmak için uygulanan en iyi tekniklerden biridir. Bu çalışmada alüminyumdan PŞ yöntemi kullanılarak üretilen parçalar, ekstrüzyon ile tam yoğunluğa çıkarılmışlardır. PŞ işlemleri, 90-140 mm püskürtme mesafelerinde ve 5-10 bar gaz atomizasyonu basınçlarında gerçekleştirilmiştir. PŞ parçalar tornalanarak 20 mm çapında silindirler haline getirildikten sonra ekstrüze edilerek, 6 mm çapında çubuklar elde edilmiştir. Ekstrüze çubuklardan hazırlanan numunelere çekme testleri uygulanmıştır. Çekme testleri sonucunda ekstrüze edilmiş PŞ parçaların çekme mukavemetlerinin, ekstrüze edilmiş döküm parçalara göre %10'a varan bir iyileşme gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, gaz atomizasyonu ve PŞ değişkenleri ile ekstrüzyon işleminin mikroyapıya etkileri ve kırılma yüzeyleri, optik ve elektron mikroskop çalışmaları yapılarak incelenmiştir.

Bilim Kodu : 914.1.092
Anahtar Kelimeler : Püskürtme şekillendirme, Ekstrüzyon, Mekanik özellikler
Sayfa Adedi : 56
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. İbrahim USLAN

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF
SPRAY FORMED ALUMINIUM CONSOLIDATED BY EXTRUSION**

(M.Sc. Thesis)

Alparslan Afşin EKİCİ

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

June 2006

ABSTRACT

Spray forming (SF) is one of the powder metallurgy techniques by which the materials having high strength, less porosity and fine grains are produced. On the other hand extrusion is one of the best techniques of closing pores of metal parts. In this study spray formed ingot aluminium parts were extruded and reached full density. SF experiments were performed at distances between 90-140 mm and atomisation pressure between 5-10 bars. After machining of spray formed preforms to cylindrical parts having 20 mm in diameter, they were extruded to rods 6 mm in diameter. Tensile tests were applied to specimens produced by extrusion. According to results of the tensile tests, nearly 10% improvement was observed on strength of the extruded spray formed parts in comparison to extruded as-cast parts. Furthermore, effects of the gas atomisation parameter and SF variables and the extrusion to microstructure and fracture surfaces were investigated by optical and electron microscope studies.

Science Code : 914.1.092

Key Words : Spray forming, Extrusion, Mechanical properties

Page Number: 56

Adviser : Assist. Prof. Dr. İbrahim USLAN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca benden yardım ve katkılarını esirgemeyen kıymetli hocalarım Yrd. Doç. Dr. İbrahim USLAN ve Prof. Dr. Süleyman SARITAŞ'a, laboratuvar çalışmalarındaki desteklerinden dolayı Sn. Kadir YILMAZ ve Sn. Aydın GÖKÇE ile makine mühendisi arkadaşlarım Aydinç AKTAŞ, Enver TAŞKIRAN, Şamil AKASLAN ve Fırat NAZİK'e, ayrıca manevi destekleriyle her zaman yanımda olan annem Ayşe Şengül EKİCİ, babam Ahmet EKİCİ ve eşim Kübra EKİCİ'ye teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	ix
RESİMLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. TOZ METALURJİSİ TEKNİKLERİ	2
2.1. Giriş	2
2.2. Atomizasyon	6
2.3. Püskürtme Şekillendirme	9
3. TAM YOĞUNLUK TEKNİKLERİ	20
3.1. Ekstrüzyon	21
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR	32
4.1. Giriş	32
4.2. Püskürtme Şekillendirme Deneyleri	32
4.3. Ekstrüzyon Deneyleri	40
4.4. Çekme Testi	44
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	50
KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ	56

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. PŞ ve ekstrüzyonla üretilmiş Al-25Si-X kompozitin mekanik özellikleri.....	24
Çizelge 3.2. Al-Si alaşımlarının mekanik özellikleri.....	29
Çizelge 4.1. Laval tipi nozula ait bazı büyüklükler.....	34
Çizelge 4.2. PŞ değişkenleri.....	35
Çizelge 4.3. PŞ parçaların yoğunluk ölçüm sonuçları.....	38
Çizelge 4.4. PŞ + Ekstrüze parçaların yoğunluk ölçüm sonuçları.....	42
Çizelge 4.5. Mikrosertlik ölçüm sonuçları.....	43
Çizelge 4.6. PŞ parçalar ile döküm parçaların yoğunluk, sertlik ve çekme testi sonuçları.....	44

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Atomizasyon modeli.....	6
Şekil 2.2. Gaz atomizasyon ünitesi.....	7
Şekil 2.3. a) PŞ metodu b) PŞ ile çok nozullu üretim.....	10
Şekil 2.4. PŞ ile şerit üretimi.....	12
Şekil 2.5. PŞ ve dövme işlemi.....	13
Şekil 2.6. PŞ ile boru üretimi.....	15
Şekil 3.1. Mekanik özelliklerin gözenek miktarına göre değişimi.....	19
Şekil 3.2. Doğrudan ekstrüzyon.....	20
Şekil 3.3. Metal tozlarının ekstrüzyonu.....	23
Şekil 4.1. Gazi gaz atomizasyon ünitesi.....	32
Şekil 4.2. PŞ deney düzeneği.....	33
Şekil 4.3. Laval tipi nozul.....	34
Şekil 4.4. PŞ ile üretilen parçaların şekli.....	35
Şekil 4.5. Çekme numunesi.....	43
Şekil 4.6. Çekme mukavemetinin PŞ mesafesine göre değişimi.....	45

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. T/M ile üretilmiş parçalar a) Dişliler b) Rulman yatakları c) Aktarma elemanları d) Kamlar e) Elektrik kontak elemanları f) Kesici takımlar ünitesi.....	3
Resim 2.2. Düşük püskürtme yoğunluğunda üretilmiş bir parçanın yapısı.....	11
Resim 2.3. PŞ ile üretilen Parçalar.....	16
Resim 2.4. PŞ alaşımların mikroyapısı a) Al-6.5Si b) Al-18Si.....	18
Resim 3.1. Ekstrüze alüminyum yapısı.....	21
Resim 3.2. Ekstrüzyon uygulanan bir külçenin boyuna kesiti.....	22
Resim 3.3. Sıkıştırılmış alüminyum alaşımı tozlar ile ekstrüze edilmiş alüminyum alaşımı tozların mikroyapıları a) 7090, b) CU78.....	23
Resim 3.4. (a) PŞ+Ekstrüzyon Al-25Si-X (Numune D) ve (b) PŞ+Ekstrüzyon Al-25Si (Numune A).....	25
Resim 3.5. Mikroyapının ekstrüzyon oranına göre değişimi a) 5:1 b) 50:1	25
Resim 3.6. Optik mikroskop görüntüleri a) Birincil Si ve arametal yapının kesilmiş yüzey ve iğne şekilli morfolojisi b) Rozet şeklindeki Si	28
Resim 3.7. a) Püskürtme yığma alaşımda ince arametal yapı içindeki birincil Si fazının görünümü (b) Geleneksel döküm alaşımın mikroyapısı	28
Resim 3.8. TEM (Geçirmeli elektron mikroskop) ile çekilmiş püskürtme yığma ve ekstrüze alaşımın eksenel bölgedeki lamelli yapısının görüntüsü	29
Resim 3.9. Ekstrüzyon uygulanmış PŞ Al-Si alaşımları a) Al-6.5Si b) Al-18Si.....	30
Resim 3.10. Ekstrüze PŞ Al-Si alaşımlarının çekme testi kırılma yüzeyleri a) Al-6.5Si b) Al-18Si.....	30
Resim 4.1. 3 nolu PŞ parçanın dağlanmamış mikroyapısı (x100) a) Üst bölge b) Alt bölge.....	36
Resim 4.2. PŞ parçalarda püskürtme yüksekliğinin etkisi (dağlanmamış) a) H=115 mm P=10 bar b) H=135 mm P=10 bar	36

Resim	Sayfa
Resim 4.3. 3 nolu PŞ parçanın mikroyapısı (dağlanmış), x100 a) Üst bölge b) Orta bölge c) Alt bölge.....	37
Resim 4.4. Ekstrüzyon kalıbı a) Kapalı kalıp, alt ve üst zımba b) Kalıp, açılmış halde.....	39
Resim 4.5. DARTEC hidrolik çekme-basma cihazı	40
Resim 4.6. Ekstrüzyon sonrası elde edilen çubuklar	40
Resim 4.7. Bakalite alınmış numuneler	40
Resim 4.8. Ekstrüze PŞ alüminyumda gözenekler. P=10 bar, eksenel düzlem, dağlanmamış, x100 a) H=90 mm b) H=115 mm	41
Resim 4.9. Ekstrüze PŞ alüminyumda gözenekler. P=10 bar, eksene dik düzlem, dağlanmamış, x100 a) H=90 mm b) H=115 mm	41
Resim 4.10. Ekstrüze PŞ alüminyumda mikroyapı. P=10 bar, dağlanmış, H=90 mm, x100 a) eksenel düzlem b) eksene dik düzlem	42
Resim 4.11. a) Çekme numunesi b) Kopmuş numune.....	44
Resim 4.12. PŞ+ekstrüze numunelerde mikroyapı (eksenel düzlem).....	46
Resim 4.13. PŞ+ekstrüze numunelerde mikroyapı (eksene dik düzlem).....	46
Resim 4.14. PŞ+ekstrüze numunelerde çekme testi sonrası mikroyapı. P=5 bar, eksene dik düzlem, x100 a) H=110 mm, σ_{UTS} =189 MPa b) H=122 mm, σ_{UTS} =191 MPa	47
Resim 4.15. Döküm+ekstrüze numunelerde çekme testi sonrası mikroyapı. Eksenel düzlem, σ_{UTS} =185 MPa x100 a) Dağlanmamış, b) Dağlanmış	47
Resim 4.16. PŞ+ekstrüze çekme numunelerinin kırılma yüzeylerine ait SEM resimleri, P=5 bar. a) H=110 mm, σ_{UTS} =189 MPa b) H=122 mm, σ_{UTS} =191 MPa	47
Resim 4.17. PŞ+ekstrüze çekme numunelerinin kırılma yüzeylerine ait SEM resimleri, P=10 bar. a) H=90 mm, σ_{UTS} =222 MPa b) H=115 mm, σ_{UTS} =213 MPa c) H=135 mm, σ_{UTS} =200 MPa d) H=140 mm, σ_{UTS} =236 MPa	48
Resim 4.18. Döküm+ekstrüze çekme numunenin kırılma yüzeyine ait SEM resmi. σ_{UTS} =207 MPa	48

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A	Kesit alan
a	Nozul gaz çıkış açısı
C	Ekstrüzyon sabiti
D	Çekme numunesinin çapı
D₁	Ekstrüzyon kalıbı giriş çapı
D₂	Ekstrüzyon kalıbı çıkış çapı
F	Ekstrüzyon kuvveti
H	Püskürtme mesafesi
L₁	Ekstrüzyon kanalı uzunluğu
m₁	Kuru deney parçasının havadaki kütlesi
m₂	Kaplanmış deney parçasının havadaki kütlesi
m₃	Kaplanmış deney parçasının sudaki kütlesi
P	Gaz basıncı
R	Ekstrüzyon oranı
σ_{UTS}	En büyük çekme gerilmesi
ρ	Yoğunluk
ρ_w	Suyun yoğunluğu

Kısaltmalar	Açıklama
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Standartları
PŞ	Püskürtme Şekillendirme
SEM	Taramalı Elektron Mikroskop
T/M	Toz Metalurjisi

1. GİRİŞ

Tane boyutu ve gözenek miktarı gibi özellikler malzemelerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Mekanik özelliklerin yüksek olmasının istendiği durumlarda, tane yapısının küçük olması ve gözeneklerin en az seviyede olması gerekmektedir.

Püskürtme Şekillendirme (PŞ); bir Toz Metalurjisi (T/M) tekniğidir. PŞ değişkenleri, üretilcek olan malzemelerin tane boyutu ve gözenek miktarına, dolayısıyla mekanik özelliklerine etki etmektedir. PŞ parçalar, üretim parametrelerine bağlı olarak %3 ile %15 arasında gözenek içerir. Diğer yandan ekstrüzyon, malzemelerde bulunan gözeneklerin kapatılmasını sağlayan en iyi tekniklerden biridir. Bir tam yoğunluk işlemi olan ekstrüzyonda yanıl malzeme akışı en yüksek seviyededir ve deformasyon çevresel basınç altında gerçekleştiğinden yüzey çatlağı da oluşmaz. Sıcak ekstrüzyon ile malzemeler %99 üzeri yoğunluklara çıkarılabilir.

Bu çalışmada PŞ değişkenleri ve ekstrüzyonun malzemelerin mekanik özelliklerini nasıl etkilediğı araştırılmıştır. Bunun için Gazi Gaz Atomizasyon Ünitesi'nde PŞ ile % 90 civarı yoğunluklarda alüminyum parçalar üretildikten sonra ekstrüzyon ile tam yoğunluğa (>% 99.9) çıkarılmışlardır. Gaz atomizasyonu ve PŞ değişkenlerinin ekstrüzyon işleminden elde edilen malzemelerin mikroyapılarına, yoğunluklarına ve mekanik özelliklerine etkileri gözlenmiştir.

Bu amaçla yapılan PŞ deneylerinde farklı gaz basıncı ve püskürtme mesafeleri kullanılmış, elde edilen parçalara daha sonra ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. Ekstrüzyon ürünü çubuklardan ASTM E 8M-03'e göre çekme test numuneleri hazırlanmıştır. Bu numuneler çekme testine tabi tutulmuş, PŞ+ekstrüzyon parçalarda döküm+ekstrüzyon parçalara göre ortalama çekme mukavemeti değeri daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

2. TOZ METALURJİSİ TEKNİKLERİ

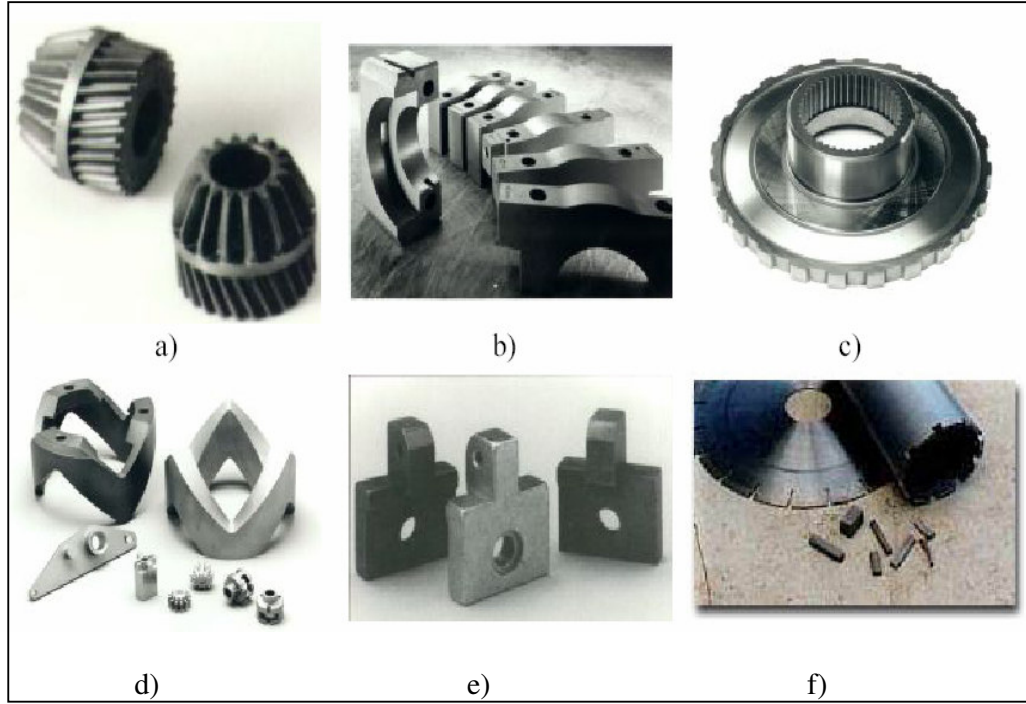
2.1. Giriş

Toz Metalurjisi'nin (T/M) amacı metal ve metal alaşımlarının tozlarını ergitmeden, basınç ve sıcaklık yardımıyla dayanıklı malzemeler haline sokmaktır [1]. Diğer metal işleme yöntemlerine göre daha farklı bir uygulama olan T/M'nin üstünlükleri; parçaların yüksek kalitede, karmaşık yapıda, çok küçük toleranslarla ve daha ucuz olarak üretilebilmesidir. T/M uygulamalarının ilk örnekleri M.Ö. 3000 yıllarına kadar dayanmakla beraber, T/M'ne olan ilgi 19.yy'ın sonlarından itibaren endüstrinin gelişmesine paralel olarak hızla artmıştır [1].

T/M uygulamalarının diğer üstünlüklerini şöyle sıralayabiliriz:

- W, Mo gibi metaller endüstriyel olarak ergitilemezler. Bu metallerden parça üretimi için T/M tek üretim yoludur.
- Kendinden yağlamalı yataklar, sert metaller ve sermetlerin üretimi gibi işlevsel sebepler.
- Çoğu zaman talaşlı imalat gerekmediği ve malzeme kullanım oranı %100'lere ulaştığı için, özellikle çok sayıda parça üretimi söz konusu olduğunda ucuzluk.

T/M'nin uygulama alanları oldukça geniştir. Özellikle otomotiv sektörüne demir veya çelik parça üretimi T/M sektörünün ana dalıdır. Parçalar sinterlenmiş olarak kullanılırlar. Bu alanda kullanılan yapısal parçaların gözenek miktarı %10 civarındadır. Malzeme kullanımı %100 ve enerji tasarrufu %50 olduğundan diğer yöntemlere göre daha ucuzdur. Sert metaller, takım çelikleri, gözenekli malzemeler ve filtreler, sürtünme elemanları, grafit fırçalar ve mıknatıslar, tungsten lamba filamentleri, dişli çarklar, kendinden yağlamalı yataklar, elektrik kontakları, nükleer güç yakıt elemanları, ortopedik gereçler, ofis makineleri parçaları, fren balataları, akü elemanları ve jet motoru parçaları metal tozlarından üretilen parçalara örnek olarak verilebilir (Resim 2.1).



Resim 2.1. T/M ile üretilmiş parçalar a) Dişliler b) Rulman yatakları c) Aktarma elemanları d) Kamlar e) Elektrik kontak elemanları f) Kesici takımlar

Takım çelikleri: Takım çelikleri hem döküm-hadde hem de T/M teknikleri ile üretilmektedir. Ancak T/M ile üretilenler performans olarak çok üstündür. Takım çelikleri özel çelikler olup %5 üzeri alaşım elementi içerir. 600°C civarında sertliklerini kaybetmemeleri ve tokluklarının yüksek olması istenir. T/M takım çelikleri gaz atomizasyonu ile üretilmiş temiz çelik tozlarına TaC, TiC, WC, MoC gibi karbürlerin katılması ile üretilirler, presleme ve sinterleme sonrasında sıcak ekstrüzyonla tam yoğunluğa ulaşırlar, karbürler çok ince ve homojen bir şekilde dağılır. Döküm takım çeliklerinde ise karbürler kendi içinde ısıl işlemle üretilirler ve homojen karbür dağılımı elde edilemez. Ayrıca karbürler daha iridir.

Sert metaller: Bileşiminde %94 WC ve %6 Co bulunur. Demir dışı metaller ve dökme demirler için bu bileşim iyi sonuç verirken çelik için problemlidir. Çeliklerde WC'ün bir kısmı TiC ve TaC ile değiştirilir. (%90 civarı karbür ve %10 civarı Co). Sert metallerin yüzeylerinin TiC ve TiN ile kaplanması sürtünme katsayısını düşürdüğü için takım ömrünü uzatır.

Sermetler: Sermet seramik+metal demektir. Seramik faz hacim olarak %15-85 arasındadır ve uranyum oksit, uranyum karbür, silikon karbür, silikon oksit, alüminyum oksit, titanyum karbür ve elmas olabilir. Metal faz ise Ni, Co, Fe, Cr, Mo, W, paslanmaz çelik, bronz, süper alaşım olabilir.

Kaymalı yataklar: Kendi kendini yağlayan veya kendinden yağlamalı yataklar olarak da adlandırılan bu yataklar, 1920'li yıllardan beri üretimi devam eden T/M uygulamalarının en popüler parçalarındandır. Genellikle %10 Sn içeren bronz tozu kullanılır.

Gözenekli ortamlar: Filtreler, alev engelleyiciler, buz çözücüler ve sıvı depolayıcılar bu gruba girer. Kullanılan toz uygulamaya göre değişmekle beraber genellikle 1 mm civarı ve üzeri boyuttadır. Tozlar bir kaba konarak hiç preslenmeden sinterlenirler. Böylece gözenekler oluşturulur. Gözenek miktarı %25 üzerindedir. Paslanmaz çelik ve bronz tozları en çok kullanılan tozlardır. Tozların küre şeklinde olmaları istendiğinden gaz atomizasyonu ile üretilirler.

Sürtünme elemanları: Fren ve debriyaj balataları gibi elemanlarda kontrollü bir sürtünme katsayısı istenir. Sürtünme katsayısı 0.3 – 0.4 arasında değişir. Ağır hizmet araçlarının hepsinin balataları T/M ile üretilir (tank, uçak, iş makineleri). Balata bileşenlerinin içinde %65-75 bakır, %2-5 kalay, %5-8 çinko, %2-5 silika ve %10-20 grafit vardır.

Elektrik ve manyetik uygulamaları: Nokta kaynağı elektrotu, metal grafit fırçalar, tungsten lamba filamanları, daimi mıknatıslar bu uygulamalara birkaç örnek olarak verilebilir.

Fotokopi tonerleri: Fotokopi tonerleri demir tozları ve plastik kaplamadan oluşur.

Yanıcı maddeler: Al, Mg, Zr ve Ti tozları roket yakıtı içinde, patlayıcılarda aydınlatma bombalarında yanıcı madde olarak kullanılır.

Roket yakıtı = Al tozu + amonyum perklorat + bağlayıcı.

Gıda maddeleri: Elektrolitik demir tozu konservelere demir minareli olarak katılır.

Amalgamlar: Diş dolgusu olarak kullanılmak için %65 Ag + %30 Sn + %5 Cu tozu civa ile karıştırılarak amalgam elde edilir.

Yaldız ve metalik boya: Bronz , Al, Zn ve pirinç tozları bu amaçla kullanılır.

T/M parça üretiminde kullanılan metal tozları 200 µm'den küçüktür. Başlıca metal tozu üretim teknikleri;

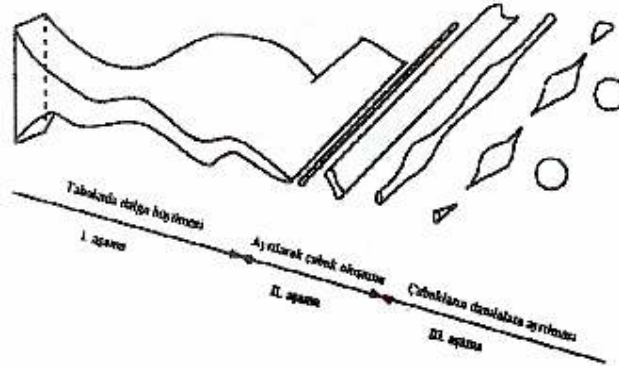
- Mekanik yöntemler
 - o Talaş kaldırma
 - o Öğütme
- Elektrolitik yöntemler
- Kimyasal yöntemler
 - o Doğrudan indirgeme
 - o Karbonil yöntemi
 - o Çöktürme yöntemi
- Atomizasyon yöntemleri
 - o Su atomizasyonu
 - o Gaz atomizasyonu
 - o Döner disk atomizasyonu
 - o Ultrasonik atomizasyon

Bir metalin veya alaşımın tozu birden fazla yöntemle üretilebileceği gibi bir yöntem pek çok farklı metalin tozunu üretebilir. T/M sektöründe kullanılan tozların %60'ından fazlası atomizasyon ile üretilmektedir [2].

2.2 Atomizasyon

Bir sıvı demetinin parçalanarak damlacıklar oluşturması atomizasyon olarak bilinir. Atomizasyon yoluyla tozlar, ergimiş metale akışkan püskürtülerek elde edilir. Bu işlemle hem metal hem de alaşım tozu elde edilebilir. Farklı alaşımlara uygulanabilmesi ve kolay işletme kontrolü olduğu için daha çok tercih edilen bir yöntemdir.

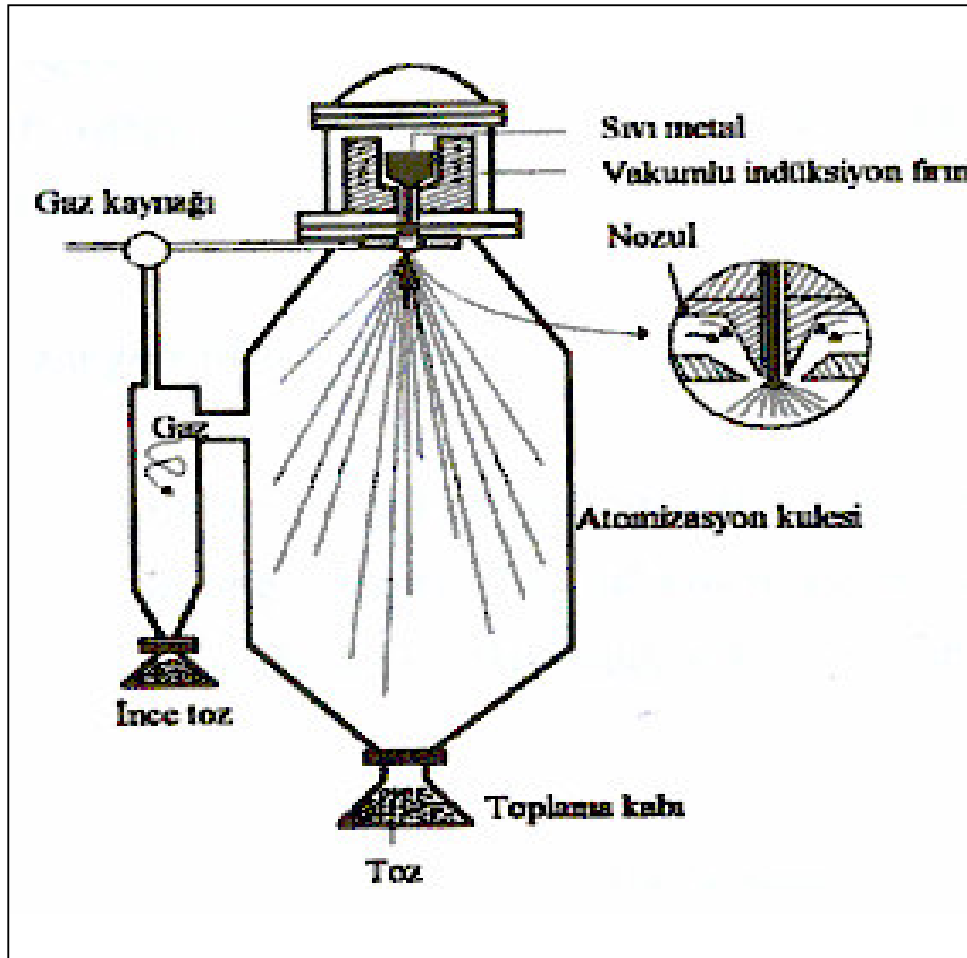
Atomizasyon mekanizmaları: Atomizasyon ile sıvı metalin parçalanması çok karmaşık bir olaydır. Sıvı metal, mazot gibi bir yakıtın atomizasyonundan daha zordur. Atomizasyon için çeşitli modeller geliştirilmiştir, en çok kabul gören model Şekil 2.1.'de gösterilen Dombrowski'ye ait modeldir.



Şekil 2.1. Atomizasyon modeli [3]

Gaz atomizasyonu: Ergimiş metali hava, azot, argon veya helyum gazları kullanarak parçalamak suretiyle toz elde etme işlemine gaz atomizasyonu denir. Sıvı metal akışkanı nozuldan çıkan yüksek hızlı gazın genleşmesi suretiyle parçalanarak küçük tanelere ayrılır. Gaz atomizasyonu; küresel yapılı yüksek yoğunlukta, iyi akıcılıkta ve yüksek kalitede olan tozların üretilmesinde yaygın bir işlemdir. Aynı zamanda gaz atomizasyonu ile yüksek saflıkta az oksijen içeren metal tozu üretimi mümkündür. Böyle tozların, püskürtme kaplama, püskürtme bağlama, kimya endüstrisi, tıp teknolojisi gibi geniş bir kullanım alanı vardır. Gaz atomizasyonu,

süper alaşımlar ile yüksek alaşımlı metallerde de çok başarılı sonuçlar vermektedir. Gaz atomizasyonu ünitelerinin tasarımları metal besleme mekanizması, ergitme ve biriktirme bölümlerinin şekline göre değişmekle beraber, ana amaç sıvı metale enerji vererek küçük tanecikler elde etmektir. Şekil 2.2.'de tipik bir gaz atomizasyon ünitesi gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Gaz atomizasyon ünitesi [3]

Atomizasyon kulesi içinde atomize olmuş sıvı metal damlacıkları uçuş süresince ısı kaybederek katılaşırlar. Bu katılaşma olayını gerçekleştirmek için atomizasyon kulesinin boyu yeterli uzunlukta olmalıdır. Böylece sıvı metal damlacıklarının kule çeperlerine yapışması da engellenmiş olur.

Düşük sıcaklıklarda çalışan atomizasyon üniteleri genellikle yatay olarak tasarlanırlar. Yüksek hızdaki gaz nozuldan çıkarken bir sifon etkisi oluşturur. Böylece ergimiş metal gazın genişleme bölgesine doğru çekilir. Yüksek gaz hızı sıvı metalin parçalanmasına neden olur ve sonuçta sıvı metal damlacıklarından bir damlacık demeti oluşur. Yüksek sıcaklıktaki metaller için oksitlenmeden korunmak amacıyla kapalı kazanlar kullanılır. Bu tip ünitelerde metal indüksiyon fırını yardımı ile ergitilir ve nozula doğru dökülür. Ergitme işlemi metalin ergime noktasının 150-200°C üzerindeki bir sıcaklıkta yapılır. Atomizasyon sırasında kullanılan gazın hacmi yüzünden bir geri basınç oluşabilir. Bunu engellemek için gazın bir fan yardımı ile dışarı atılması gerekir. Gaz atomizasyon işleminde üretilen tozlar küresel olup, toz boyutu değişkendir. Gaz cinsi, artık atmosfer, sıvı metalin sıcaklığı ve viskozitesi, alaşımın tipi, sıvı metal debisi, gaz basıncı, gaz debisi ve hızı, nozul geometrisi ve gaz sıcaklığı, gaz atomizasyonuna ait değişkenlerdir. Bu değişkenler, işlem kontrolünü ve istenilen boyutta toz üretimini sağlamak için kullanılır. Üretilen tozların homojen olması ve küresel toz şeklinden dolayı iyi paketleme özelliklerine sahip olmaları, gaz atomizasyonun belirgin bir üstünlüğüdür.

Gaz atomizasyonunda sıvı metale ne kadar enerji verilebilirse o kadar küçük toz elde edilebilir. Sıvı metal, etrafından gelen gazın etkisi ile nozul çıkışında bir koni şeklini alır. Yine gazın etkisi ile bu koni tepeden aşağıya doğru ince bir tabaka haline gelir, bu tabaka geniş alanlı ve düşük yoğunluklu olduğundan kararlı değildir. Sıvı metal tabakası; ivmelendirme ve kesme kuvvetlerinin etkisi altında kalır ve önce çubuksu şekle dönüşür, daha sonra da küçük küreleri oluşturur. Boyut küçülmesi sıvının viskozitesi ve sıcaklığı ile ilgilidir. Nozuldan aşağıya doğru gidildikçe sıvı metal şekli silindir, koni, ince ve geniş tabaka, çubuk ve küre halini alır (Şekil 2.1.). Aşırı ısıtma ve diğer değişkenlere bağlı olarak bu yapılardan herhangi biri üretilebilir. Ayrıca nozul etrafındaki türbülansın dolayısı küçük tozlar tekrar gaz genişleme alanına girebilir. Bunun sonucunda da topaklanma denilen birleşmeler olur. Bu birleşmeler ise istenen bir durum değildir.

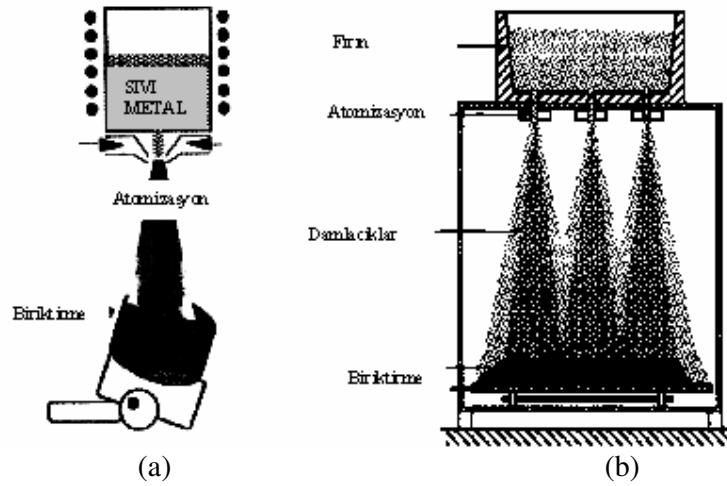
2.3 Püskürtme Şekillendirme

Püskürtme şekillendirme (PŞ) Dünya ve Avrupa sanayilerinin kullandığı, ileri teknoloji ile malzeme üretme yöntemidir. Bu yöntemle geleneksel olarak yapılamayan alaşımların ve ürünlerin üretimi mümkündür. PŞ ürünleri geleneksel yöntemlerle üretilen ürünlerde olmayan, çok küçük tane boyutu ve yok denecek kadar az ayrışma gibi özelliklere sahiptir. Bu şekilde üstün mekanik özellikleri olan malzemeler üretilmiş olur. PŞ ile üretilen birçok ürünün özellikleri T/M işlemi ile üretilen ürünlerle benzerlik gösterir.

PŞ işlemi, parça üretmek için, atomizasyon ve birleştirme/pekiştirme olaylarının sırayla gerçekleşmesi prensibine dayanır. İşlemin ana çekiciliklerinden biri yüksek malzeme biriktirme oranıdır (0.2-2 kg/s). İşlemin diğer üstünlükleri küçük tane boyutu, alaşım elementlerinde çok düşük ayrışma ve daha iyi mekanik özelliklerdir [4].

PŞ yöntemi Osprey Ltd. şirketi tarafından 1960'lı yıllarda geliştirilmiştir. PŞ ünitesi, aslında bir gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi ünitesinden oluşmaktadır. Bütün PŞ uygulamalarının prensibi, sıvı metal veya alaşımlarının bir gaz yardımıyla atomize edilmesine dayanır. Atomize olmuş sıvı metal damlacıkları soğutucu bir yüzey üzerine yönelirler ve bu yüzeye çarparlar [4,5,6]. Çarpmanın etkisiyle yassılaşır ve küçük diskler şeklinde üst üste gelerek katılaşır. Damlacık boyutları ve hızı değişmekle beraber, tipik olarak ortalama damlacık boyutu 150 µm ve ortalama damlacık hızı 15 m/s'dir. Damlacıkların hızlı bir şekilde katılaşması için biriktirme işleminin yapıldığı diskin yüzey sıcaklığı, biriktirilen metal veya alaşımın katılaşma sıcaklığından düşük olmalıdır. Biriktirme yapılan diskin yüzeyi ince bir oksit veya seramik filmiyle kaplanabilir. Bu sırada yüzeye çarpan damlacıkların yüzeye tutunması için diskin yeterli pürüzlülükte olması gerekir. Diğer taraftan yüzey pürüzlülüğü, biriktirilen metalin ve diskin kalıcı birleşme ile mekanik bir kilitleme oluşturacak kadar fazla olmamalıdır. İri ve homojen bir kütle elde edilmiş ise, disk üzerinden alınıp sıcak veya soğuk dövme yapılarak PŞ ürünü olarak imal

edilebilir. Eğer damlacık demeti, yollarına yerleştirilmiş dönmekte olan bir milin yüzeyine çarparsa onu kaplamaya başlar. Mil aynı zamanda döndüğünden, katılaşan damlacıklarla elde edilen kaplama çevresel olarak eşit kalınlıkta oluşur. Böylece çeşitli kalınlıklarda borular üretmek mümkündür. Mil yatay olarak yerleştirilebileceği gibi, dikey veya açılı olarak yerleştirilip yavaş yavaş aşağı doğru çekilebilir. Şekil 2.3.a'da PŞ yöntemi gösterilmektedir. Bazı PŞ uygulamalarında birden fazla nozul kullanılabilir. (Şekil 2.3.b.)



Şekil 2.3. a) PŞ metodu b) PŞ ile çok nozullu üretim

PŞ'nin faydaları ve PŞ değişkenleri: şekil ve boyutlarda çok hassas tolerans sağlanması, mikroyapıda uyum ve yüksek miktarda üretim yapılabilmesi Osprey metodunun ticari alanda getirdiği faydalardır. Bunlar da bazı bağımsız işletme değişkenlerinin anlaşılmasını ve etkilerinin kontrol edilmesini gerektirir. Bu değişkenler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Sıvı metalin sıcaklığı
- Sıvı metalin akış oranı
- Gaz basıncı
- Püskürtme hareketi
- Püskürtme yüksekliği (nozul ve plaka arasındaki mesafe).

- Plakanın hareketi (dönüş hızı, geri çekilme hızı, eğim açısı).

Bunlara sıvı metal akış memesi çapı, atomizasyon ünitesi boyutları ve düşen biriktirme plakası veya mil malzemesi gibi değişkenler de ilave dlebilir. Gaz debisinin metal debisine oranı olan özgül gaz tüketimi ise bir başka anahtar değişkendir [4].

Püskürtme şekillendirmenin modellenmesi: Püskürtme şekillendirmeyi mikroyapı ve ürün özelliklerine göre eniyileme yapmak için işlemi modellemek önemlidir. Bunu da işlem aşamalarını altı alt gruba bölerek yapabiliriz. Bu alt gruplar; atomizasyon, püskürtülen sıvı, düşen damlacıklar, plakanın başlangıç şekli, plakadaki katılaşma ve mikroyapının gelişimidir [4].

Modelleme çalışmaları ve deneysel çalışmalar sonucunda, damlacıkların durumunun bu altı grup içerisinde en önemli yeri teşkil ettiği gözükmetedir. Düşen damlacıkların sadece belli bir oranı plaka yüzeyine yapışır. Bu oran yapışma verimi olarak adlandırılır. Yapışma verimi püskürtülen sıvı tabakalarının şekli, mikroyapısı ve elde edilen üründe temel bir yer teşkil eder. Yapışma verimi, püskürtülen sıvı durumu ve plaka yüzeyinin bir fonksiyonu şeklindedir [4].

PŞ parçaların yapısı: Biriktirilen damlacıkların yapısı malzemedeki en belirgin özelliktir. Çünkü son ürünün mekanik özellikleri tamamen bu yapıya bağlıdır. Düşük püskürtme yoğunluğunda üretilmiş bir parçanın kesiti Resim 2.2’de gösterilmiştir [7]. Şekilde de görüldüğü gibi, diske hemen hemen paralel olan ve birbiri üzerine yatmış durumda tabakalardan oluşmuş bir yapı meydana gelmiştir. Bu tür parçalarda ara sıra küçük küresel parçalara rastlanır (Resim 2.2.). Bu parçalar diske ulaşmadan katılaşmış ve toz haline gelmişlerdir. Püskürtülen sıvı yoğunluğu az ise bu tabakalar arasında kalıntı gözenekler oluşur. Genellikle gözenek miktarı %3 ile %15 arasında değişir. Bununla beraber vurgulanması gereken diğer bir nokta ise, bu şekilde üretilen parçaların mukavemetinin sinterlenmemiş T/M ürünlerine göre çok daha yüksek olmasıdır. Parçanın yapısı disk düzleminde genellikle izotropik, normal yönde ise anizotropiktir. Sınırlı miktarda yapılan sıcak şekillendirme veya soğuk şekillendirme işleminden sonra bu gibi yapılar genellikle izotropisini korurlar Bu

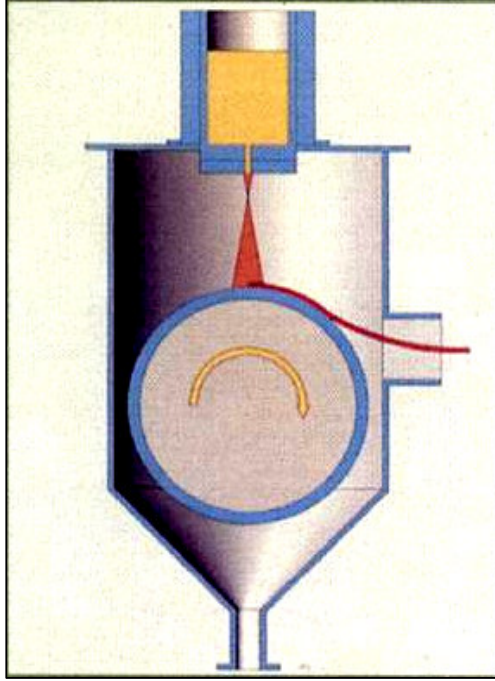
durum ise, genellikle faydalıdır (derin çekme sırasında kulakçık verme, başak verme olayını azaltır).



Resim 2.2. Düşük püskürtme yoğunluğunda üretilmiş bir parçanın yapısı [4]

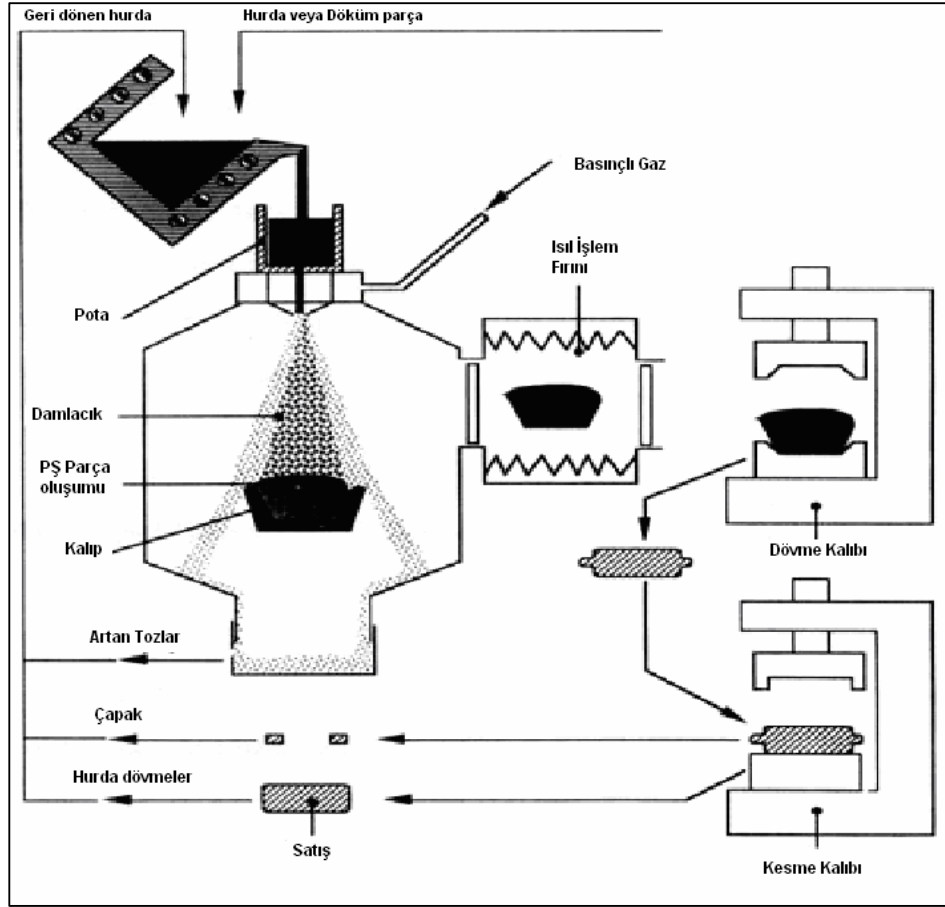
Püskürtme şekillendirme yöntemleri: Endüstriyel alanda da uygulanan ana PŞ yöntemleri aşağıda açıklanmıştır. Bunlara ek olarak halen araştırma halinde olan değişik uygulamalar da vardır.

Püskürtme sarma: Bu yöntemle sürekli veya yarı – sürekli şekilde olmak üzere kalınlığı 1 mm'nin üzerindeki aralıklarda olan şeritler üretilmektedir (Şekil 2.4.). Maksimum kalınlık Al alaşımlarında olup 18 mm civarındadır. Bu yöntemdeki ana zorluk şeridin kalınlığının tüm genişlik boyunca aynı olmasını sağlamaktır; aksi takdirde şerit sarılırken şekil bozuklukları gibi problemler ortaya çıkmaktadır. Kalınlık hatası %2'nin altında olduğu sürece bu işlemden problem çıkmaz [7]. Bu yöntemle kompozitleri kolay ve ucuza üretmek mümkün olmaktadır. Çeşitli sürtünme elemanları ve aşınmaya dirençli malzemeler bu yöntemle şerit halinde üretilmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda bu şekilde üretilen kompozit sürtünme elemanlarının geleneksel yöntemlerle üretilen sürtünme elemanlarına göre daha iyi sürtünme katsayısına sahip olduğu ve daha fazla dayanıp, sürtünme katsayısının zamanla değişmediği görülmüştür.



Şekil 2.4. PŞ ile şerit üretimi

Püskürtme dövme: PŞ’ deki ilk gelişme püskürtme dövme konusunda olmuştur. Bu işlemde gaz atomize metal doğrudan bir kalıba yöneltilir veya bazı durumlarda hareket ettirilebilen düzlem şeklinde bir tabaka üzerine yönlendirilir (Şekil 2.5.). Yüksek yoğunluklu püskürtme kullanılarak gözenek miktarı %1’ler civarında tutulur, böylece malzemede iç oksitlenme oluşma imkanı azaltılarak dövme işlemi dışarıda yapılabilir [8]. Osprey metal şirketi tarafından alaşım çeliklerinden ve süper alaşımlardan bir çok dövme işlemi yapılmaktadır. Dövme işleminden önceki malzeme mükemmel bir sıcak işlenebilirliğe sahiptir. Dövme işleminden sonra parça tam yoğunluğa ulaşır. Böylece üretilen parçalar, normal dövme ile üretilen parçalara göre daha yüksek mekanik özellikte ve çok daha izotropik bir yapıda olur. Ayrıca oksit miktarı da T/M parçalara göre daha azdır.



Şekil 2.5. PŞ ile dövme işlemi

Merkezkaç püskürtme depolama: Merkezci bir deliği olan ve eksenel simetriye sahip metal parçalarını, merkezkaç ile püskürtme elde ederek üretme ilk olarak Swensea'de araştırılmıştır [8]. Uygulama iyi tane yapılı ve homojen parçaları, çok iyi atmosfer kontrolünde üretebildiği için endüstriyel alanda potansiyeli olan bir uygulama olarak görülmüştür. Bu uygulamanın önemli üstünlüğü, atomizasyon için gaz kullanma ihtiyacının olmamasıdır. Buna ek olarak diğer yollarla üretilmesi zor olan, iyi tane yapılı ve mekanik özellikleri iyi olan büyük çaptaki bilezikler ve kısa tüplerin üretilmesidir.

Püskürtme kaplama: Ergime noktası düşük olan Al ve Zn gibi metallerle çeliği kaplama işlemi geleneksel yöntemlerle; çeliğin üstündeki oksit tabakasını yüksek sıcaklıkta indirgeme ile azaltıp daha sonra çeliği hala sıcakken ergimiş Al, Zn veya

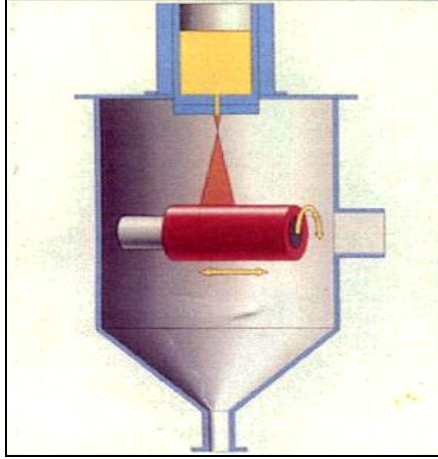
Al–Zn banyosuna daldırmak suretiyle yapılır. Bu tipteki daldırma metoduyla kaplama işleminde tek taraflı kaplama veya iki tarafı farklı kalınlıkta kaplama gibi işlemler yapılamaz. Ayrıca 15µm’ den az ve 75µm’ den çok olan kalınlıktaki kaplamalar da daldırma yoluyla yapılamaz [8]. Ayrıca çelik, ergimiş alüminyum veya çinko ile yüksek sıcaklıkta yeterli süre temas halinde bulunursa kaplamanın ve metalin temas noktasında bir alaşım katmanı oluşur. Bu alaşım katmanı gevrek bir yapıda olduğu için malzemenin eğilme özellikleri etkilenir. Malzeme püskürtme kaplama yapılırsa; bu durumda arada alaşım tabakası meydana gelmez. Çünkü çelik ergimiş Al ile milisaniyeler civarında temasta olur. Ayrıca püskürtme kaplamada, istenilen kalınlıkta kaplama yapma ve çok katlı kaplama imkanı da sağlanır. Tek kısıtlaması 25µm’ nin altında kaplamaların zor olmasıdır.

Püskürtme şekillendirmenin endüstriyel uygulamaları: PŞ ürünleri; silindir kütükler, borular, kaplanmış ürünler, alüminyum, bakır, nikel, demir ve silikon bazlı alaşımlar, otomotiv, elektronik ve uzay teknolojileri gibi şekil, alaşım ve pazar açısından geniş bir alana sahiptir. PŞ uygulamalarına aşağıdaki gibi örnekler gösterebiliriz;

Yuvarlak çubuklar: Japon Sumitomo şirketi 1991’den beri püskürtme şekillendirme ile yüksek kromlu dökme demir ve yüksek karbonlu yüksek hız çeliğinden silindirler yapmaktadır. Bu silindirlerden daha sonra yuvarlak çubuk, düz çubuk, tel çubuk elde etmek için yuvarlak miller imal edilir. Ürünler dökümle elde edilen ürünlere göre daha saf, hızlı katılaşmış bir mikroyapıdan dolayı termal yorulma direnci yüksek ve daha uzun ömürlüdür. Elde edilen silindirler 800 mm çapında ve 0,5 m boyundadır [4,9].

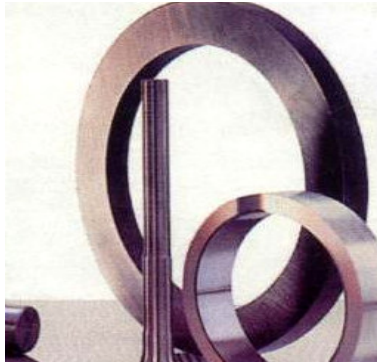
Borular: Dönen bir mil üzerine püskürtme yapılarak çeşitli ebatlarda borular üretilebilir (Şekil 2.6.). İsveç’te Sandvik isimli şirket 400 mm çap × 8 m uzunlukta ve et kalınlığı 50 mm olan boruları PŞ ile üretmektedir. PŞ ile dışı korozyona karşı dayanıklı bir katmanla kaplanmış bimetalik borular önemli bir piyasayı oluşturmaktadır. Diğer uygulamaları, kazanlar ve atıkların yakılması için kullanılan

fırınlardır. Sandvik şirketi bu fırınları PŞ yoluyla imal etmek için korozyona karşı dayanıklı bir alaşım olan (sanicro 65)'i geliştirmiştir [4,9].



Şekil 2.6. PŞ ile boru üretimi

Halkalar: Amerikan Howmet şirketi, gaz türbin motorları için PŞ ile 800 $\varnothing$ x 0,5 m boyunda halkalar üretmektedir (Resim 2.3.) [4,9].



Resim 2.3. PŞ ile üretilen parçalar

Kütükler: Yatay veya dikey PŞ ünitelerinde genellikle Cu ve Al yuvarlak kütükler üretilmektedir. 1,2 tonluk ergitme kapasitesi ile, $\varnothing$ 400 mm ve boyu 1,2 m olan takım çeliği ve paslanmaz çelik PŞ ile üretilebilir. Elde edilen kütükler daha sonra

üretilen parçaya göre ekstrüzyon yapılır veya haddelenirler. Bu şekilde üretilen Al-Si parçalar otomotiv endüstrisinde kullanılır (piston, birleştirme çubuğu vb.) [4, 9].

Literatürde PŞ ile ilgili birçok çalışma vardır [10-17]. Lavernia vd. [10] düşük karbonlu çeliklerde PŞ süresince ısı transferini ve katılma davranışını sonlu elemanlar metodu kullanarak incelemişlerdir. Bu çalışmada PŞ işleminde yığılan parçanın üst yüzeyinin sıcaklığının hesaplamalarda oldukça önemli bir parametre olduğu; bu sıcaklığın difüzyon yoluyla birleşmeyi sağlayacak, ancak mikroyapıda tane büyümesine neden olmayacak büyüklükte olması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca yığılan parça yüksekliğinin kesit alanının sürekli olarak değişmesi sebebiyle işlemin kararsızlığına vurgu yapılmıştır.

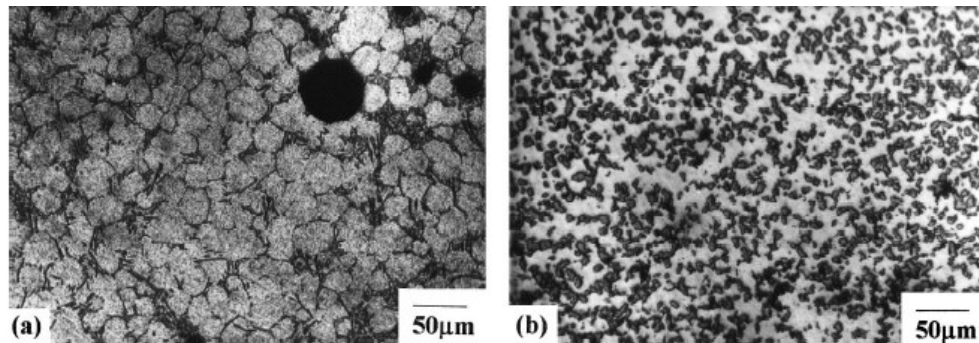
Takahara, PŞ ile üretilmiş ötektoid üstü Al-Si alaşımlarının özelliklerini araştırdığı çalışmada [11]; gaz/metal debisi oranının 5'ten büyük olduğu durumlarda katılma hızının arttığını ve eğme mukavemeti değerinin arttığını belirtmiştir. Al-yüksek Si ikili alaşımı düşük ekstrüzyon edilebilme özelliğine sahip olmasına rağmen, bu çalışmada PŞ Al-Si alaşımının iki kademedeki ekstrüzyonu 6m/dak gibi yüksek hızlarda gerçekleştirilmiştir. Yapılan diğer mekanik testlerle de, PŞ malzemenin dayanımının geleneksel T/M malzemelere göre daha fazla olduğu gösterilmiştir.

PŞ bakır alaşımlarındaki gözenekliliğe Zr, Ti ve Al gibi reaktif elementlerin etkisi Müller vd. tarafından araştırıldığı çalışmada [12]; yapı içinde hapsolan atomizasyon gazı sebebiyle PŞ işleminde gözenekliliğin önlenemediği belirtilmiştir. Azot kullanarak yapılan PŞ işleminde, boşlukların bakır içinde çözünmeyen azot ile dolduğu, azotla reaksiyona giren Zr, Ti ve Al gibi elementlerin alaşımın özellikleri üzerinde ilave bir etki yaptığı gösterilmiş, bu etki azot ve TiN bileşenlerinin miktarı analitik yöntemler kullanılarak da doğrulanmıştır.

Lee ve arkadaşları [13]; dispersiyon ile sertleştirilmiş bakır alaşımlarını geleneksel PŞ ve reaktif PŞ yöntemleri kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Geleneksel PŞ yöntemi için ağırlıkça 7:3 oranlarındaki Cu-%2Ti ve Cu-%2B master alaşımları 1500°C'de indüksiyon ile ergitildikten sonra azot gazı kullanılarak atomize edilmiş; elde edilen

Cu-Ti-B alaşımındaki PŞ parçalar, alaşım içindeki parçacık dağılımlarını araştırmak için hızla soğutulmuşlardır. Reaktif PŞ için ise, püskürtülen sıvı Cu-%2Ti içine 60µm ortalama boyuta sahip azot atomize Cu-%1.15B alaşım tozları enjekte edilmiştir. Yapılan mikroskobik incelemeler; geleneksel PŞ yönteminde sıvı Cu-Ti-B alaşımı içinde oluşan Ti ve B arasındaki kimyasal reaksiyonun, reaktif PŞ yönteminde damlacıkların yığılmasından sonra gerçekleşmesinden dolayı, dağılmış parçacıkların reaktif PŞ yönteminde daha ince olduğunu göstermiştir. Nano boyuta sahip dağılmış parçacıklara bağılı olarak, reaktif PŞ parçaların akma mukavemeti değerleri de yüksek çıkmıştır.

PŞ ile üretilmiş Al-Si alaşımlarının mikroyapı ve mekanik özellikleri ile ilgili başka bir çalışma da Srivastava ve arkadaşları [14] tarafından gerçekleştirilmiştir. Yapılan mikroyapı çalışmaları; PŞ Al-6.5Si alaşımının, tane sınırlarında yuvarlağımsı şekilli ötektik Si fazına sahip küresel α fazından oluştuğunu göstermiştir (Resim 2.4.a). PŞ Al-18Si alaşımının mikroyapısında ise; α fazından oluşan ana yapı içinde düzgün olarak dağılmış ince parçacıklar halinde Si fazı gözlenmiştir (Resim 2.4.b). Üretilen Al-6.5Si ve Al-18Si PŞ alaşımlarına, 480°C sıcaklıkta 6:1 oranında sıcak ekstrüzyon uygulanmıştır. Oda sıcaklığında çekme testi uygulanan PŞ alaşımların mukavemetleri ile süneklikleri, döküm alaşımlara göre önemli ölçüde iyileşme göstermiştir.

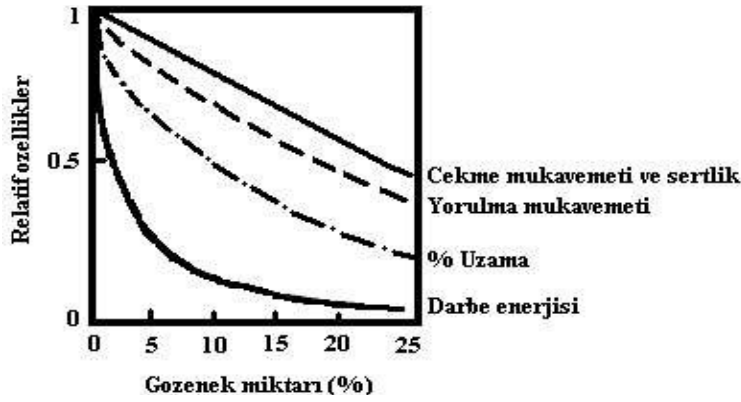


Resim 2.4. PŞ alaşımların mikro yapısı a) Al-6.5Si b) Al-18Si

Literatürdeki mevcut çalışmalara verilen örneklerden [10-14] başka; Wang vd. [15] PŞ ile üretilen ötektoid üstü Al-Si-Fe alaşımlarının mikroyapıları ve mekanik özellikleri, Zambon ve arkadaşları [16] PŞ Al-%6Fe alaşımlarının özelliklerinin ön karıştırılmış Al-%6 Fe/SiC_p kompozitlerinin özellikleriyle karşılaştırılması, Ha [17] ise Al-25Si ötektoid üstü alaşımın PŞ ile üretimi ve deformasyon davranışı üzerine yapmış olduğu çalışmalarda da, PŞ işleminin mekanik özellikleri iyileştirdiği belirlenmiştir.

3. TAM YOĞUNLUK TEKNİKLERİ

T/M malzemelerin mekanik özellikleri yapıdaki gözenek miktarına bağlıdır. Bu gözenekler yok edilirse mekanik özellikler artar. Bazı mekanik özelliklerin gözenek miktarına bağlılığı Şekil 3.1’de verilmiştir [2].



Şekil 3.1. Mekanik özelliklerin gözenek miktarına göre değişimi

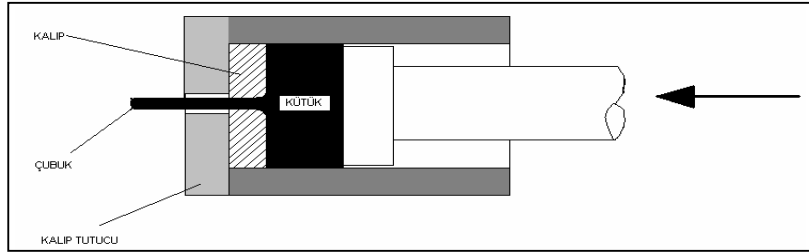
Şekilden görüldüğü gibi, mekanik özelliklerin hepsi artan gözenek miktarı ile azalmaktadır. Çekme mukavemetindeki düşme en yavaştır. Darbe enerjisi ise en şiddetli düşüşü gösterir. %1 gözenek miktarı bile (%99 yoğun) darbe enerjisini çok düşük değerlere indirir. Mekanik özellikler sadece gözenek miktarına değil aynı zamanda gözenek tipine (ayrık veya bağlı), şekline ve büyüklüğüne bağlıdır. Küresel gözenekler en az zararlıdır. Yüksek performans istenen bütün uygulamalarda gözenekler yok edilmelidir. (< %1). Tam yoğunluk teknikleri yoğunluğu %99,9 üzerine çıkaran tekniklerdir.

PŞ parçalar içerisinde şartlara bağlı olarak %3 ile %15 arasında gözenek bulunur. Gözenekleri en az seviyeye indirip parçaların mekanik özelliklerini geliştirmek gerekir. Bu da plastik deformasyonla yapılır. Parçayı plastik deformasyona uğratmanın bir çok yolu vardır: (i) İzostatik presleme: Parçaya her yönden eşit basınç uygulanır. Bu durumda gözenek tamamen kapanmaz, ancak boyutu küçülür. (ii) Presleme: Parçaya her yandan basınç uygulanır, alt ve üst basınçlar yanlardaki

basınçlardan fazladır, gözenek yana hareketle kısmen kapanabilir. (iii) Açık kalıpta toz dövme: Parçaya alttan ve üstten basınç uygulanır, gözenekler yana hareketlerle tamamen kapanır ancak, parçada fiçilaşma ve çatlak oluşumuna yol açar. (iv) Kapalı kalıpta toz dövme: Yığma ve presleme tekniklerinin birleşimi şeklindedir. Parça önce yığmaya maruz kalır, fiçilaşma ve çatlak oluşumundan önce presleme başlar. (v) Ekstrüzyon: Gözenek kapatmak için en iyi tekniklerden biridir. Yanal malzeme akışı maksimumdur ve yüzey çatlağı da oluşmaz.

3.1. Ekstrüzyon

Bir metal bloğun kovanlara yerleştirilerek bir ıstampa yardımıyla basınç altında, belirli profillere sahip kalıplar içerisinden geçirilerek şekillendirilmesine ekstrüzyon denir (Şekil 3.2.). Metal malzemelerin ekstrüzyonu genellikle sıcak şekilde yapılır. Kurşun, kalay gibi yumuşak malzemelere soğuk ekstrüzyonla da şekil verilebilir.

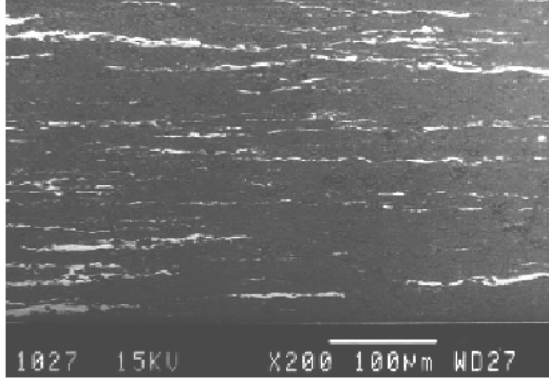


Şekil 3.2. Doğrudan ekstrüzyon

Oksitlenme oluşmaması, yeniden kristalleşme sıcaklığı altında yapıldığı için daha iyi mekanik özellikler elde edilmesi ve uygun yağlayıcılar kullanılması halinde iyi yüzey kalitesi vermesi soğuk ekstrüzyonun üstünlükleridir. Resim 3.1’de ekstrüzyon sırasındaki yanal malzeme akışı gösterilmektedir [18].

Ekstrüzyon, T/M malzemeleri tam yoğun hale getirmek için kullanılan yöntemlerden biridir. %85-90 yoğunluğa çıkarılmış ve sinterlenmiş toz metal kütlelerin sıcak ekstrüzyon ile %99 üzeri yoğunluğa çıkarılması için kullanılır. Örneğin; süperalaşımlar ve takım çelikleri soğuk izostatik presleme ile %90 yoğunluğa

ulaştırılır, daha sonra ekstrüzyonla %99 üzeri yoğunluğa çıkar. Tozun deformasyonu ve akışa ulaşmasındaki direnci ölçen ekstrüzyon sabiti (C) şu şekilde ifade edilir:

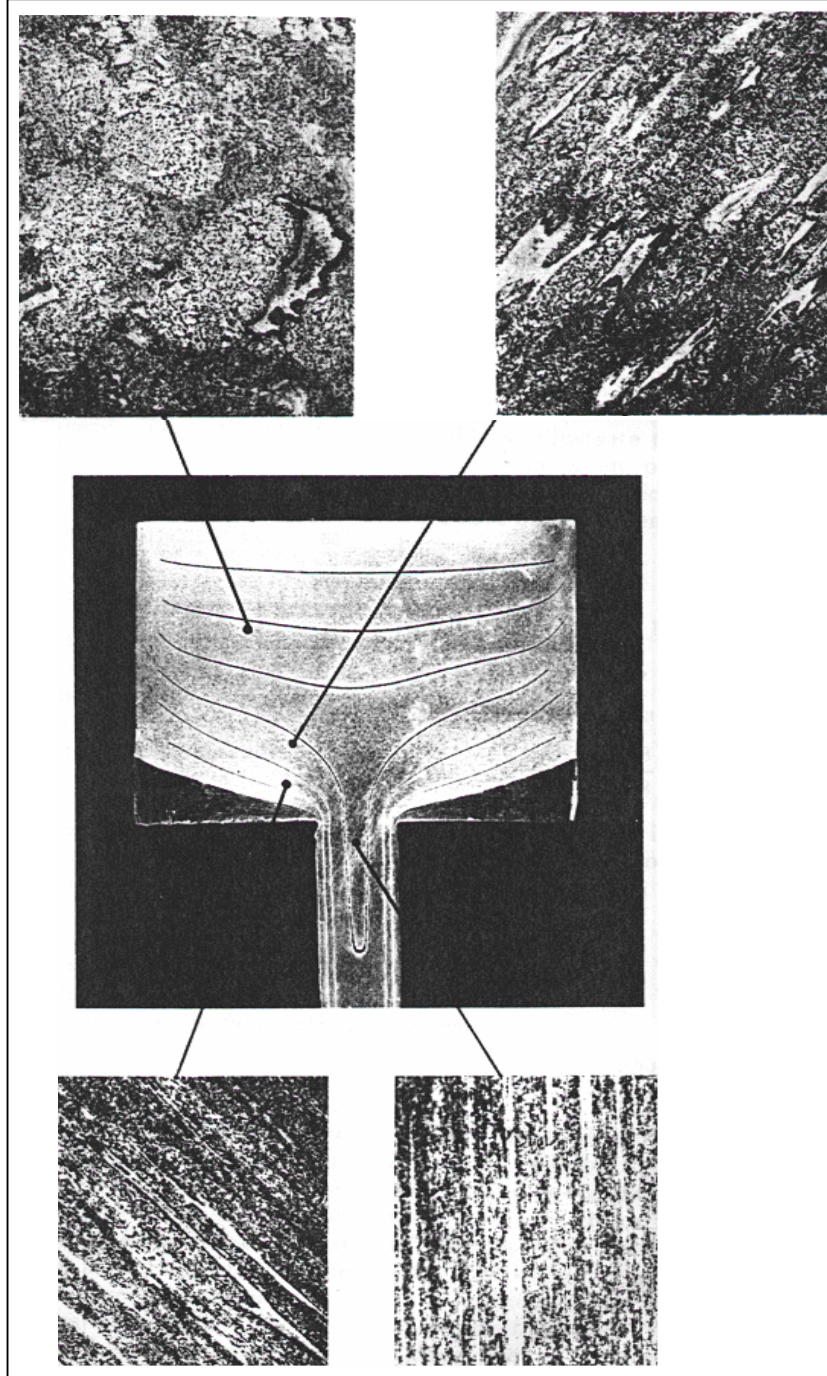


Resim 3.1. Ekstrüze alüminyum yapısı [9]

$$C = \frac{F}{A \cdot \ln(R)} \quad (3.1)$$

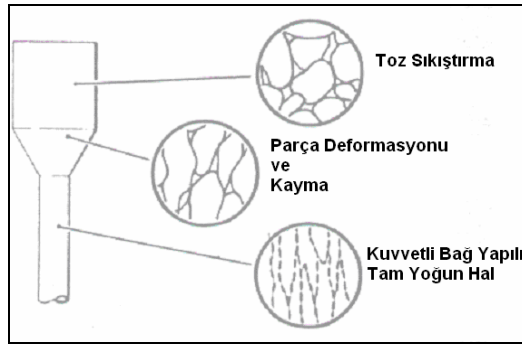
Burada F ekstrüzyon kuvveti, A kesit alan, R ekstrüzyon oranıdır. Ekstrüzyon oranı, ekstrüzyona girmeden önceki malzeme alanının ekstrüzyondan sonraki malzeme alanına oranıdır. Deneysel bulgular malzemedeki yüzey çatlağı oluşmadan yoğunlaşma sağlanması için azaltma oranının 10'dan fazla olmasını önermektedir. Sıcaklık artarsa ekstrüzyon sabiti azalır. Ekstrüzyonun kolaylığında malzemenin özellikleri etkili olmakla beraber, sıcaklık ana işlem kontrol değişkenidir. Çok yüksek sıcaklık malzeme mikroyapısını etkiler ve ekstrüzyon kalıbının ömrünü azaltabilir. Buna karşılık çok düşük sıcaklık, yüksek kuvvet gerektirdiğinden ekstrüzyonu zorlaştırır. Ekstrüzyonu başlatmak için gereken kuvvet, akışı sürdürürken gerekli olan kuvvetten daha fazladır. Resim 3.2'de ekstrüze edilen bir döküm malzemedeki mikroyapının bölgesel olarak değişimi gösterilmiştir. Özellikle hızlı katılaştıran metal ve karışım tozlarında ekstrüzyonla soğuk birleştirme istenir. Alt tabakadaki metalin bağ yapabilmesi için yüzeydeki parçacık kirliliğinin ortadan kaldırılmasının gerektiği kabul edilmektedir. Ekstrüzyon, metal tozunun yüzeyini geren ve temiz metali açığa çıkaran büyük deformasyon gerinimini sağlayabilir. Ek olarak, ekstrüzyon tam yoğunluğu sağlayan ve maksimum parçacık bağını sağlayan oldukça sıkıştırıcı bir

işlemdir. Gerekğinde gözenek kapatmada ve ürün güvenilirliğini artırmada, çevresel basıncı artırmak için ekstrüzyona ilave olarak hidrostatik basınç

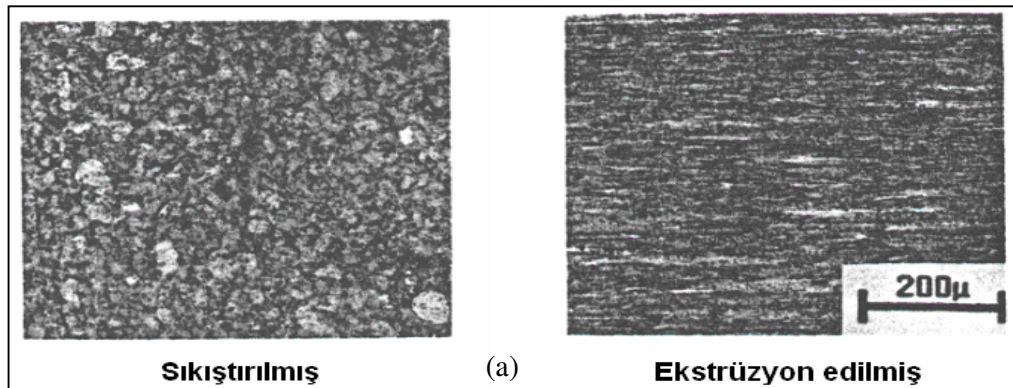


Resim 3.2. Ekstrüzyon uygulanan bir külçenin boyuna kesiti [19]

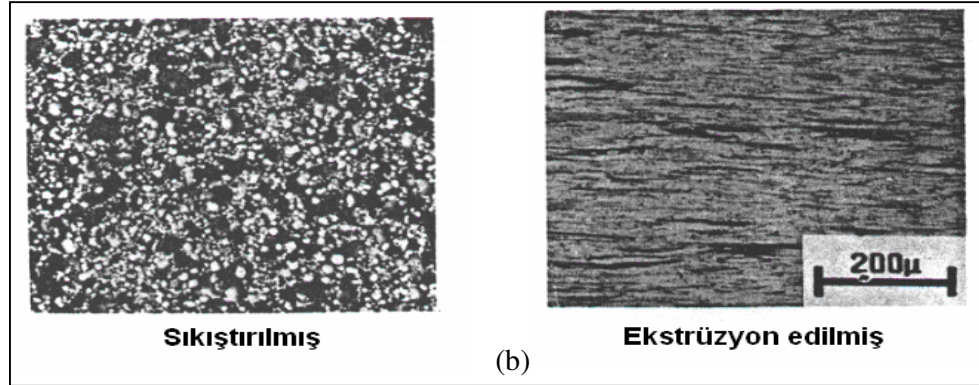
eklenebilir. İlk olarak bölgesel deformasyon, yüzey kesilmesi ve başlangıç bağı ile, tozların tekrar yerleşmesi, daha sıkı paketlenmesi (izostatik sıkıştırma ile) ve yoğunlaştırılması gerçekleşir. Deformasyon bölgesinde gözenek kapatılması olan bölgelerdeki küçük değişimler dışında toz parçaları sürekli bir yapıdaki külçenin deformasyonunda olduğu gibi deforme olurlar. Parçalar uzadıkça yüzeyleri gerginleşir, oksit tabakası parçalanır ve metal açığa çıkar. Devam eden deformasyonla, parça ara yüzleri boyunca gözeneklerin yok edilmesi ve yapının tasfiyesi ile beraber metal-metal bağları artar (Şekil 3.3.). Üründe yapının tasfiyesinin ve bağların derecesi, azaltma oranının bir fonksiyonudur. Resim 3.3.'de preslenip sıkıştırılan ve ekstrüze edilmiş iki farklı alüminyum alaşımının mikroyapıları gösterilmiştir [20].



Şekil 3.3. Metal tozlarının ekstrüzyonu [20]



Resim 3.3. Sıkıştırılmış alüminyum alaşımı tozlar ile ekstrüze edilmiş alüminyum alaşımı tozların mikroyapıları a) 7090, b) CU78 [20]



Resim 3.3. (Devam) Sıkıştırılmış alüminyum alaşımı tozlar ile ekstrüze edilmiş alüminyum alaşımı tozların mikroyapıları a) 7090, b) CU78 [20]

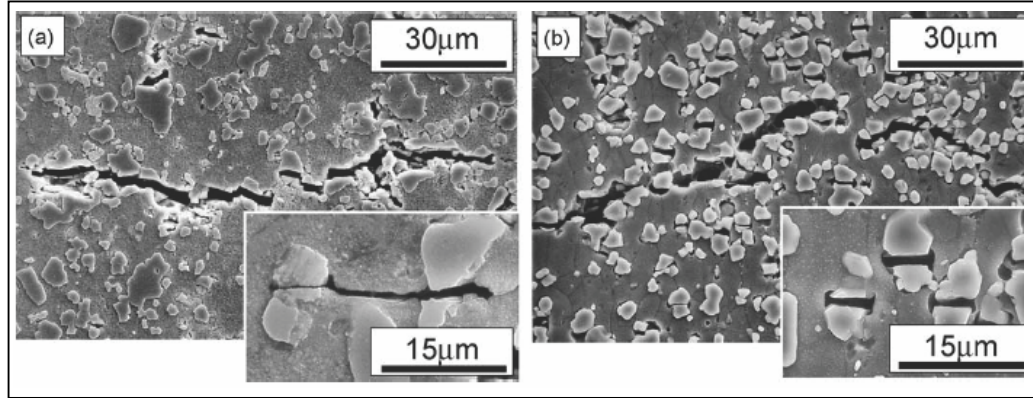
Literatürde, PŞ ve ekstrüze edilmiş parçaların mekanik ve mikroyapı özellikleri ile ilgili çeşitli çalışmalar mevcuttur [21-32]. Seok vd. [21] düşük gaz/metal debisi oranı ile (yaklaşık $0.8 \text{ m}^3/\text{kg}$) üretilen azot atomize ötektik üstü PŞ Al-Si-X kompozitlerin ekstrüzyonundan elde edilen numunelerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır (Çizelge 3.1.) [21].

Çizelge 3.1. PŞ ve ekstrüzyonla üretilmiş Al-25Si-X kompozitin mekanik özellikleri

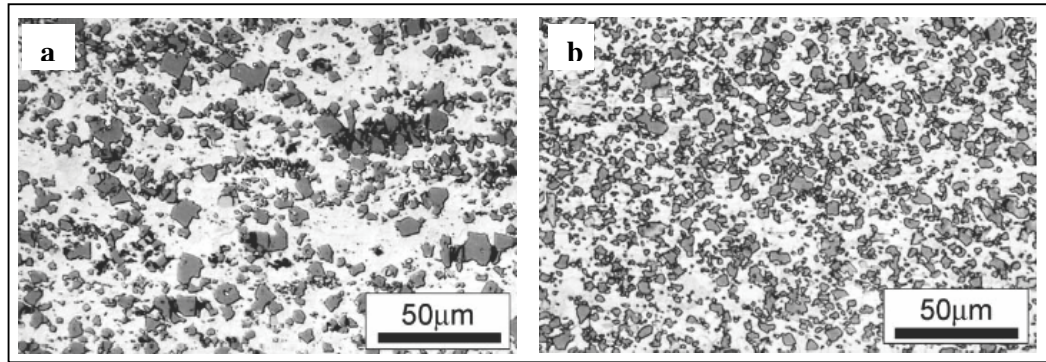
Numuneler		Özellikler		
		σ_{UTS} (MPa)	% Uzama	Elastik modül (GPa)
A	Al-25Si (F)	164	14,8	88.4
B	Al-25Si (T4)	166	8,5	88.4
C	Al-25Si-3.67Cu-1.11Mg-0.4Fe (F)	228	2,3	88.6
D	Al-25Si-3.67Cu-1.11Mg-0.4Fe (T6)	420	0.8	88.7

F: Üretildiği gibi; T4: 530°C 3 saat; T6: 495°C 2 saat; ve 190°C 10 saat;

Çizelge 3.1.'den görüldüğü üzere, çekme mukavemetinin artmasıyla kompozitlerin uzaması hızla azalmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen PŞ+ekstrüze farklı iki numuneye ait mikroyapı resimleri Resim 3.4'de, farklı ekstrüzyon oranlarına sahip PŞ numunelerin mikroyapı görüntüleri ise Resim 3.5'de verilmiştir.



Resim 3.4. (a) PŞ+Ekstrüzyon Al-25Si-X (Numune D) ve (b) PŞ+Ekstrüzyon Al-25Si (Numune A)



Resim 3.5. Mikroyapının ekstrüzyon oranına göre değişimi a) 5:1 b) 50:1

Seok ve arkadaşları yaptıkları bu çalışma [21] sonucunda; düşük gaz/metal oranında PŞ parçaların yüksek oranda gözenek içerdiğini, PŞ parçalara uygulanan ekstrüzyon işleminde artan ekstrüzyon oranı ile kompozitlerdeki Si parçacıkların ve gözeneklerin boyutlarının küçüldüğünü bildirmişlerdir. Ekstrüzyon sıcaklığının gözenek yok etmedeki etkisinin çok belirgin olmadığı, fakat ekstrüzyonun yüksek sıcaklıkta yapılması durumunda daha düşük basınçların uygulanabileceği belirtilmiştir. Yumuşak ana yapı Al-25Si-X kompozitin bütün kırılma yüzeyinde çatlamış birçok Si parçacıkları görülmüş, bununla beraber sert ana yapı Al-25Si-X kompozitte kırılan Si parçaları büyük çoğunlukla ana çatlak üzerinde bulunmaktadır (Resim 3.4.).

Lianxi vd. [22], atomize 2024 alüminyum alaşımlarının sıcak hidrostatik ekstrüzyonundan elde edilen çubukların mekanik ve mikroyapı özelliklerine, ekstrüzyon sıcaklığı ve oranın etkisini araştırmışlar; alaşım tozlarının yoğunlaştırılması için optimum ekstrüzyon sıcaklığının 430-450 °C, ekstrüzyon oranının ise 21:1'den az olması gerektiğini bildirmişlerdir.

Arif [23], ekstrüzyon işlemi için tasarım diyagramlarının geliştirilmesi ve deformasyonun değerlendirilmesi için sonlu elemanlar analizinin kullanılması üzerine teorik bir çalışma gerçekleştirmiştir.

Alüminyum ve kurşun alaşımlarının soğuk ekstrüzyonu üzerinde ekstrüzyon hızı ve kalıp geometrilerinin etkisinin araştırıldığı çalışmalarında Onuh ve arkadaşları [24] kalıp tasarımı için ekstrüzyon basıncının en az olması gerektiğini belirtmişler, böylece kalıp ömrünün artacağını bildirmişlerdir.

Murai vd. [25], ekstrüze AZ31B magnezyum alaşımlarının (Mg-%3.3Al-%0.88Zn) mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerinde ekstrüzyon şartlarının etkisini incelemişler ve artan ekstrüzyon oranının tane yapısını incelttiğini; düşük sıcaklıklarda ve düşük ekstrüzyon hızlarında yapılan ekstrüzyon işleminin tane boyutunu küçülttüğünü belirtmişlerdir.

Yongchang ve arkadaşları PŞ ZA27 alaşımının mekanik özellikleri ve sönümleme davranışı üzerinde ekstrüzyonun etkilerini inceledikleri çalışmada [26], 80 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda malzemelerin sıcaklığa duyarlı hale geldiğini ve daha düşük frekanslarda daha yüksek sönümleme sergilediklerini; ekstrüze edilmiş PŞ malzemenin ise en yüksek sönümleme kapasitesine sahip olduğunu göstermişlerdir.

Siegert ve Huber [27] karbon enjekte edilen PŞ bakır alaşımları elde ettikten sonra bunları ekstrüzyon yaparak mekanik özelliklerini incelemişlerdir.

Fuxiao vd [28], PŞ Al-Si-Pb alaşımlarından malzemeler üretilip bunları farklı oranlarda ekstrüze ettikten sonra oda sıcaklığında çekme testine tabi tutmuşlar, artan

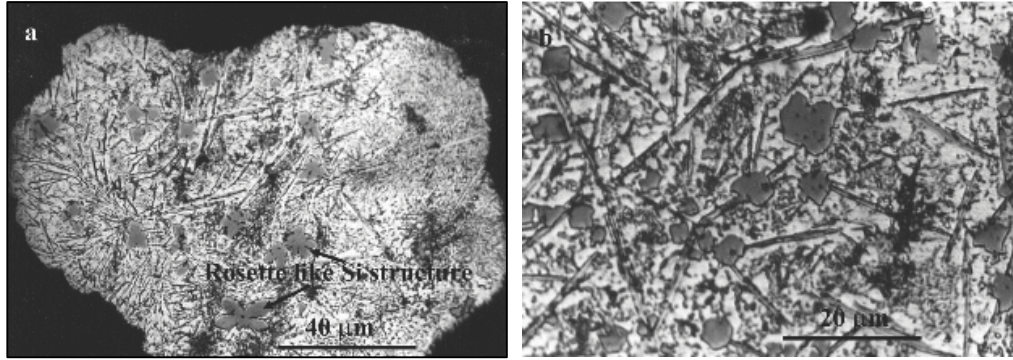
Pb miktarının mukavemeti düşürdüğü ve sünekliği artırdığı sonucunu elde etmişlerdir.

PŞ AC9A alüminyum alaşımasının ekstrüzyon karakteristiklerini inceledikleri çalışmalarında Su vd. [29]; ekstrüze çubukların yüzey hataları, morfoloji ve farklı ekstrüzyon şartlarında gözeneklilik için döküm AC9A alaşımı ile karşılaştırmalar yapabilecek sonuçlara ulaşmışlardır.

Filho ve arkadaşları [30], PŞ ve sıcak ekstrüzyon ile yoğunlaştırılmış Al esaslı alaşımların burulma özelliklerini araştırmışlardır.

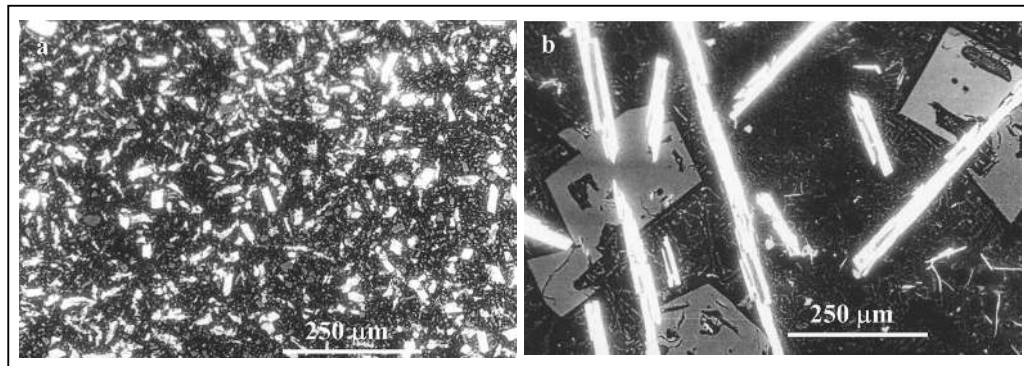
Chen ve Tsao [31], Si ilave edilmiş AZ91 magnezyum alaşımasının PŞ işlemini çalışmışlar, şekillendirilebilirliği araştırmak için ekstrüzyon uygulamışlardır. Karşılaştırma yapabilmek için de, PŞ AZ91 alaşımı ile aynı içeriğe sahip döküm alaşımını ekstrüze etmişlerdir. PŞ malzemelerde Mg_2Si ve $Mg_{17}Al_{12}$ parçacıkların daha ince ve eş eksenli olmaları, ayrıca ekstrüzyondan önce ve sonra düzgün bir şekilde dağılmaları sebebiyle daha iyi şekillendirilebilirliğe sahip olduklarını bildirmişlerdir.

Srivastava ve arkadaşları da [32], PŞ ile Al-18Si-5Fe-1.5Cu (wt.%) alaşımından parçalar üretilip bunların ekstrüzyonu üzerine çalışmalar yapmışlardır. Her PŞ parçadan 25 mm çapında ve 50 mm boyunda çubuklar çıkarıp bunları 480 °C'de 6:1 ekstrüzyon oranında sıcak ekstrüzyona tabi tutmuşlardır. Yaptıkları mikroyapı çalışmalarında birincil Si ve arametal yapının kesilmiş yüzey ve iğne şekilli morfolojisi açıkça görülmektedir (Resim 3.6.a). Bazı Si parçacıkları ise rozet şeklindedir (Resim 3.6.b). Ayrıca Al ana yapı içindeki Si ve arametal yapının düzenli şekildeki dağılımı da belirlenmiştir.

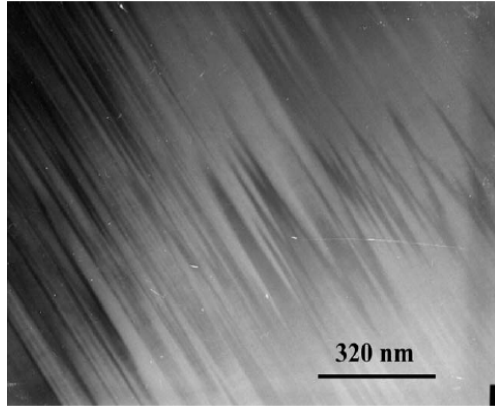


Resim 3.6. Optik mikroskop görüntüleri a) Birincil Si ve arametal yapının kesilmiş yüzey ve iğne şekilli morfolojisi b) Rozet şeklindeki Si

Geleneksel döküm ve T/M ile karşılaştırıldığında PŞ alaşımının mikroyapısındaki ince yapı açıkça görünmektedir. PŞ alaşımında ince tabakalı arametal yapı ile 3-10µm büyüklüğünde Si fazı görülmektedir (Resim 3.7.a). PŞ arametal yapıdaki tabakalar toz parçacıklarına göre çok daha küçük görünmektedir. Bu özellikler 90-150 mm kübik yapıli birincil Si fazıyla beraber bulunan arametal fazdaki 170-200 mm boyutlarındaki uzun parlak çubukların yapısından belirgin derecede farklıdır (Resim 3.7.b). Bu çalışma PŞ ile alaşım yapıldığında arametal fazların iğne yapıli dikdörtgen şeklinde olduğunu göstermektedir. Numunelerin enine kesitlerinin mikroyapılarında görünen özelliklere ek olarak, eksenel kesitlerde belirgin biçimde lamelli yapıya rastlanmıştır (Resim 3.8).



Resim 3.7. a) Püskürtme yığma alaşımında ince arametal yapı içindeki birincil Si fazının görünümü (b) Geleneksel döküm alaşımının mikroyapısı



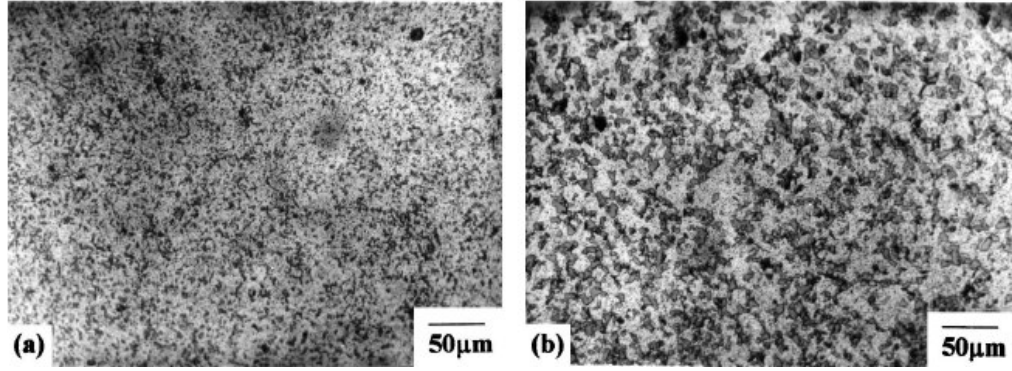
Resim 3.8. TEM (Geçirmeli elektron mikroskop) ile çekilmiş püskürtme yığına ve ekstrüze alaşımın eksenel bölgedeki lamelli yapısının görüntüsü

Srivastava ve arkadaşları [14] başka bir çalışmalarında ise, ekstrüzyon uyguladıkları Al-6.5Si ve Al-18Si PŞ alaşımlarını çekme testine tabi tutarak, PŞ alaşımlarının mukavemetleri ile sünekliklerini döküm ve döküm+ekstrüzyon numunelerin mekanik özellikleri ile karşılaştırmışlardır. (Çizelge 3.2) Sonuç olarak PŞ+ekstrüze alaşımın mekanik özelliklerinin belirgin şekilde iyi olduğunu göstermişlerdir.

Çizelge 3.2. Al-Si alaşımlarının mekanik özellikleri

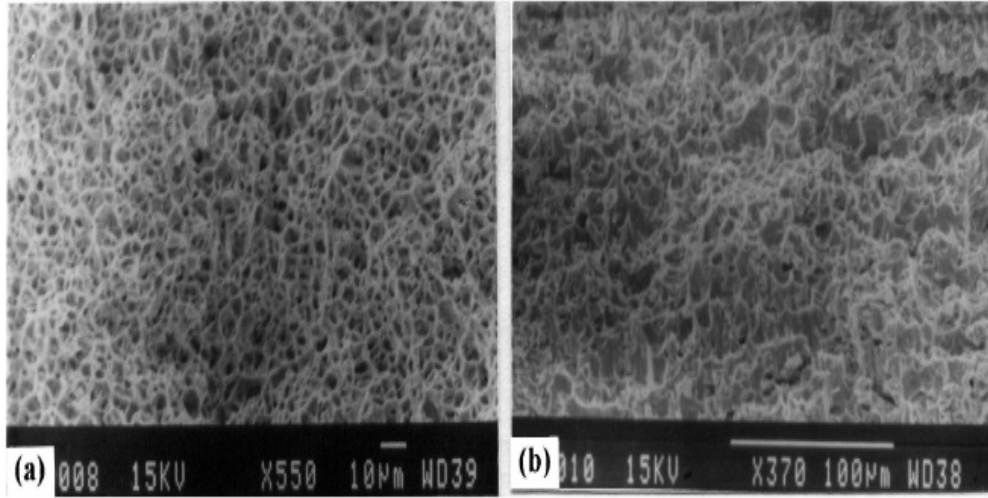
İçerik	Uygulanan işlem	Çekme özellikleri			Mikrosertlik (HV)
		Akma Muk. (MPa)	Çekme Muk. (MPa)	% Uzama	
Al-6.5Si	Döküm	77.2	130.9	9.0	31.54
Al-6.5Si	PŞ+Ekstrüzyon	75.5	132	34.3	39.35
Al-18Si	Döküm+Ekstrüzyon	97.5	129	6.7	41.10
Al-18Si	PŞ+Ekstrüzyon	119.5	158	18.7	58.57

Çizelge 3.2’de içerikleri verilen Al-Si alaşımlarının ekstrüzyon sonrası mikroyapılarında ise, Al-6.5Si alaşımında α -Al fazına ait ana yapı içinde ince dağılmış ötektik Si fazı (Resim 3.9.a) ve Al-18Si alaşımında düzgün dağılmış Si parçacıkları (Resim 3.9.b) tespit edilmiştir [14].



Resim 3.9. Ekstrüzyon uygulanmış PŞ Al-Si alaşımları a) Al-6.5Si b) Al-18Si

Ekstrüze edilmiş aynı PŞ alaşımlarına uygulanan çekme testlerine ait kırılma yüzeylerinin taramalı elektron mikroskop görüntülerinde tespit edilen küçük çukurcukların (Resim 3.10), bu alaşımların sünek şekilde kırıldığının bir ifadesi olduğu bildirilmiştir [14].



Resim 3.10. Ekstrüze PŞ Al-Si alaşımlarının çekme testi kırılma yüzeyleri a) Al-6.5Si b) Al-18Si

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

4.1 Giriş

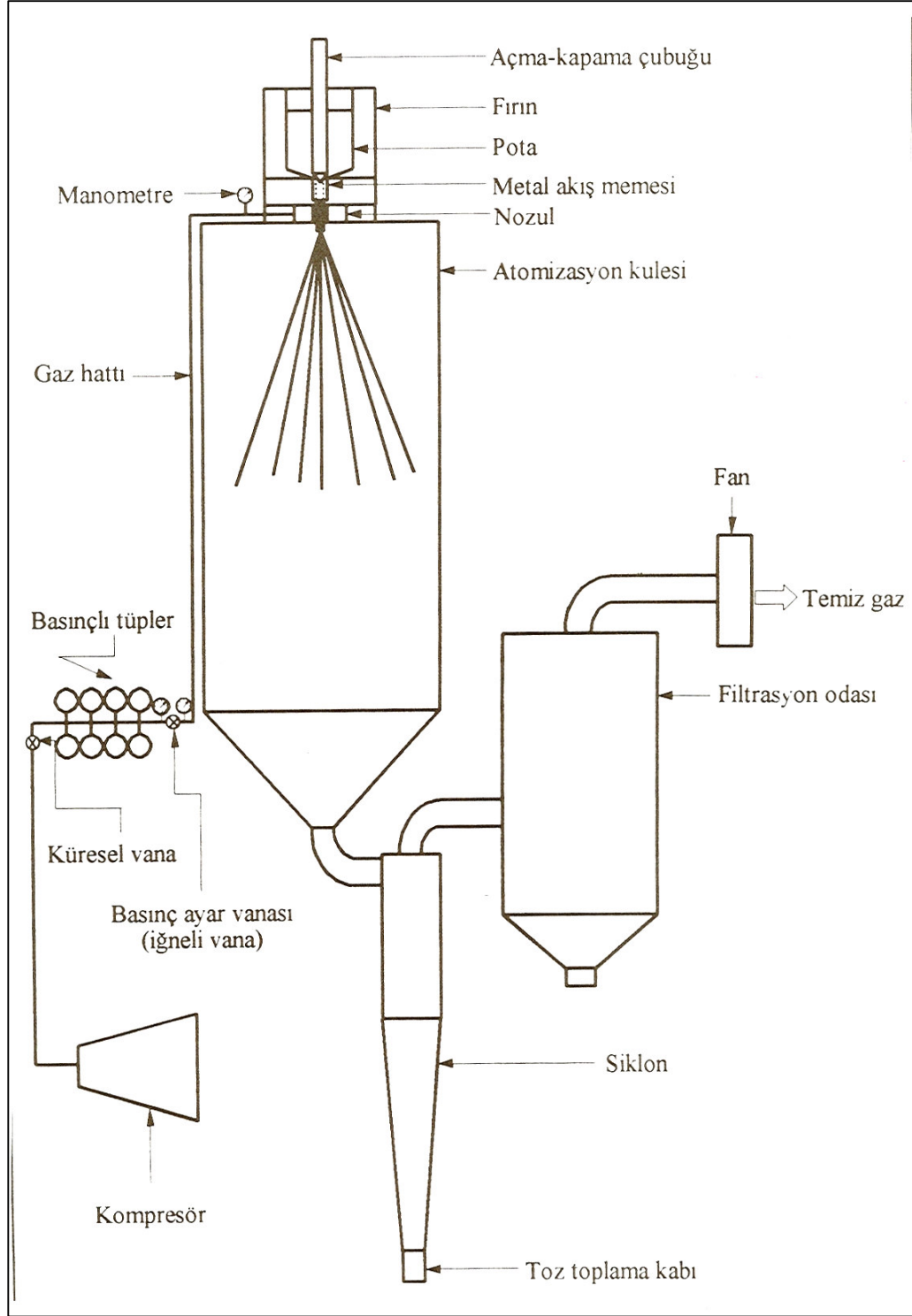
Deneyler üç aşamada yapılmıştır. Birinci aşamada Gazi Gaz Atomizasyon Ünitesi'nde püskürtme şekillendirme yöntemiyle alüminyum parçalar hazırlanmıştır. İkinci aşamada bu parçalara ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. Son olarak döküm+ekstrüzyon ve PŞ+ekstrüzyon alüminyum numunelerin çekme testleri gerçekleştirilip, mikroyapı ve mekanik özellikleri belirlenmiştir..

4.2 Püskürtme Şekillendirme Deneyleri

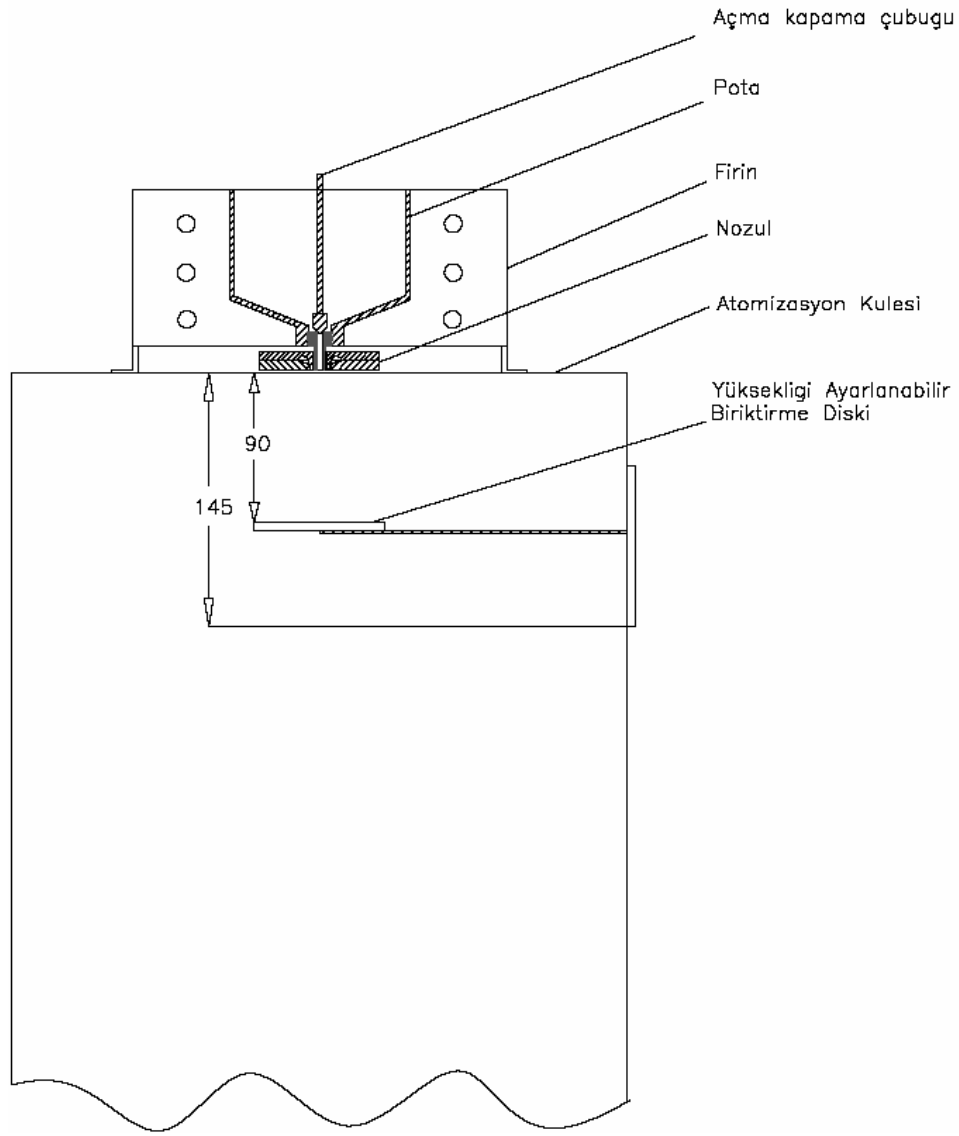
PŞ çalışmaları, Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Toz Metalurjisi Laboratuvarı'nda bulunan Gazi Gaz Atomizasyon Ünitesi'nde yapılmıştır (Şekil 4.1.). Gaz atomizasyon üniteleri; gaz sistemi, ısıtma ve ergitme bölümü, nozul, atomizasyon kulesi ve toz tutma bölümü olmak üzere beş ana bölümden oluşmaktadır.

PŞ çalışmaları için atomize olan damlacıkların üzerinde biriktirildiği, nozul altından itibaren farklı yüksekliklere yerleştirilebilen 50 mm çapında alüminyum disk kuleye monte edilmiştir. (Şekil 4.2.)

Deney için saf alüminyum kütükten kesilmiş parçalar kullanılmıştır. Yaklaşık 300 g ağırlığındaki parçalar, kule üzerine yerleştirilen elektrik direnç fırını içindeki potada ergitilmiştir. Bütün deneyler 850 °C sıcaklıkta, başka bir ifadeyle sıvı alüminyum yaklaşık 190 °C aşırı ısıtarak yapılmıştır. Deneylerde, basınçlı tüplerin vanası açılıp ayarlanan basınçta hava nozula gönderilir gönderilmez, ergitme potasında bulunan açma kapama çubuğu kaldırılarak sıvı metalin akması sağlanmış; böylece alüminyumun atomizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Atomizasyon sonucu oluşan damlacıklar nozul altına yerleştirilmiş disk üzerinde biriktirilerek püskürtme şekillendirme ile parça elde edilmiştir.



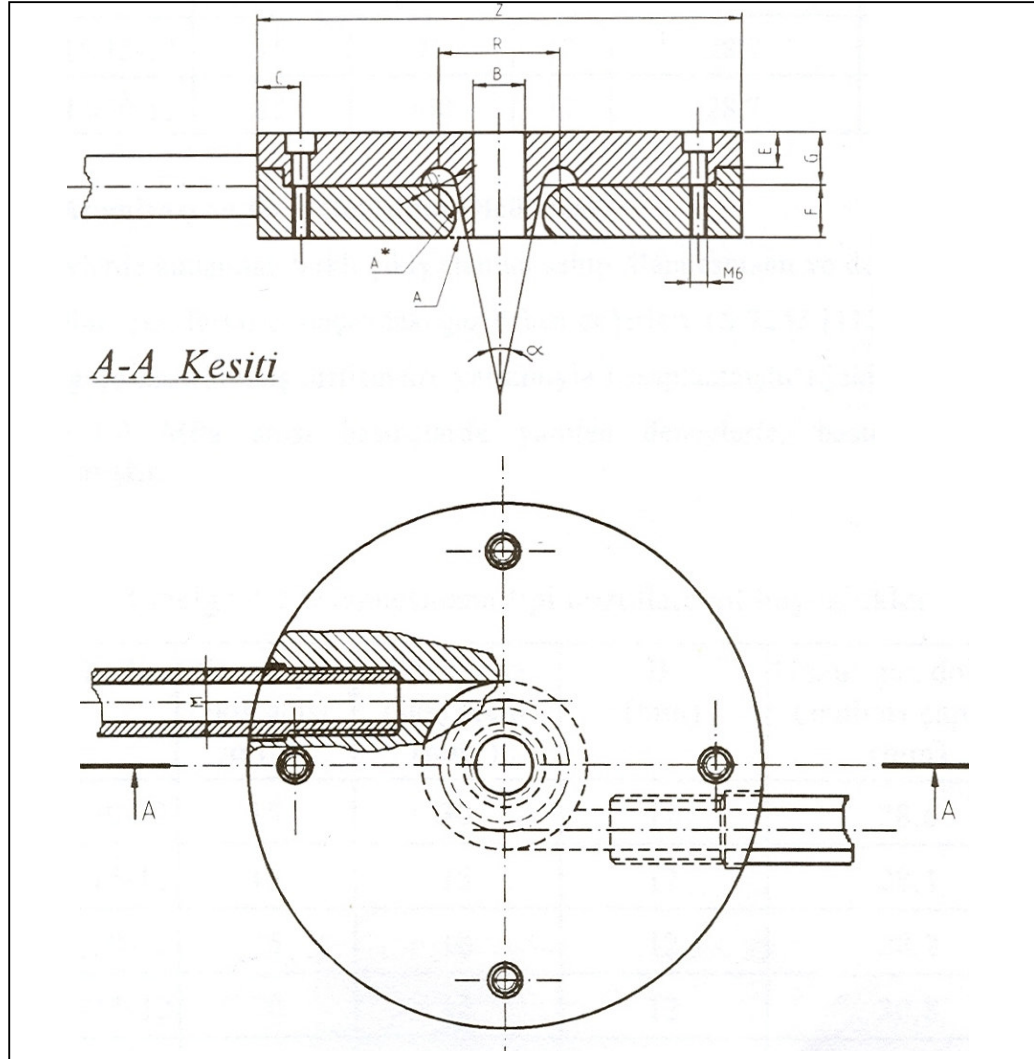
Şekil 4.1. Gazi gaz atomizasyon ünitesi



Şekil 4.2 PŞ deney düzeneği

Çizelge 4.1. Laval tipi nozula ait bazı büyüklükler

Nozul gaz çıkış açısı α (°)	Nozul gaz çıkış alanı A (mm ²)	B (mm)	Nozul gaz dolaşım çemberi çapı R (mm)	Boğaz alanı A^* (mm ²)
15	75	12	28,7	15



Şekil 4.3. Laval tipi nozul

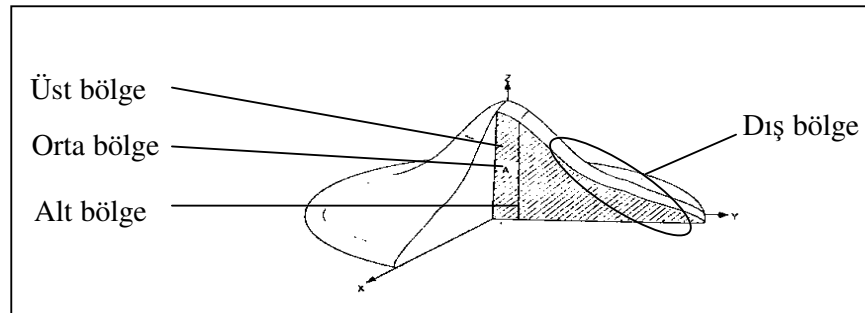
Deneyler sırasında sıvı metalin akış çapı 3 mm olarak sabit tutulmuş, boyutları Çizelge 4.1.'de verilen daralan-genişleyen kesite sahip Laval tipi nozul (Şekil 4.3.) kullanılmış ve nozul altından itibaren 7 farklı mesafede, 2 farklı basınç uygulanarak toplam 7 deney yapılmıştır. 850 °C'ye aşırı ısıtılan ve 3 mm çapındaki sıvı metal akış borusundan akıtılan sıvı alüminyumun hava kullanılarak atomize edildiği PŞ

deneylerine ait gaz basıncı (P) ve disk ile nozul arasındaki mesafe olarak tanımlı olan püskürtme mesafesi (H) değerleri Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. PŞ değişkenleri

Deney no	1	2	3	4	5	6	7
Gaz basıncı P (bar)	10	5	10	5	10	10	5
Püskürtme mesafesi H (mm)	90	110	115	122	135	140	145

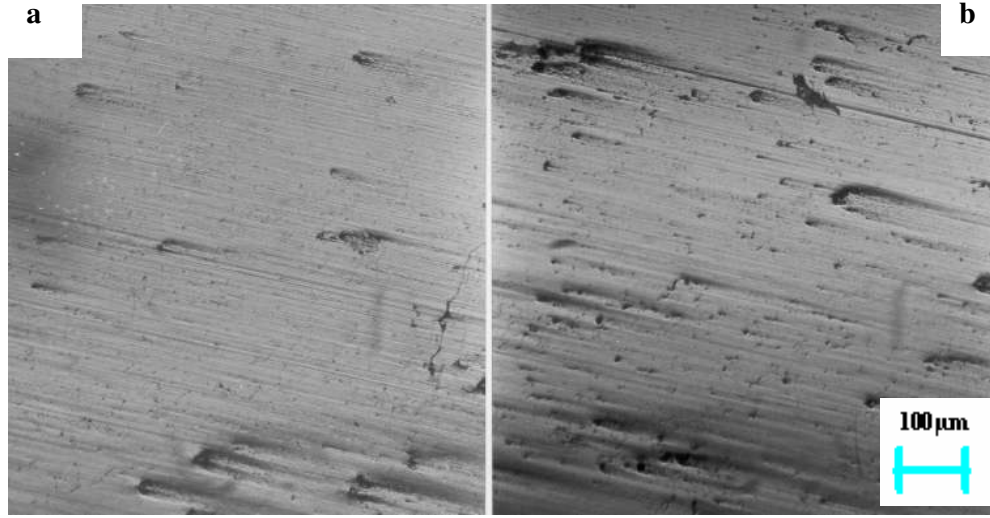
PŞ deneyleri sonunda Şekil 4.4'teki gibi numuneler elde edilmiş, bunlardan mikroyapı incelemeleri için parçalar alınmıştır. Alınan parçalar sırası ile 80, 280, 500, 1000 ve 1200 no'lu zımparalar kullanılarak zımparalanıp 9 μ ve 1 μ 'lik elmas pasta ile parlatılmıştır. Hazır hale gelen parçaların optik mikroskop altında x100 büyütme ile fotoğrafları çekilmiştir. Resim 4.1'de 3 nolu deneyden elde edilen numunenin üst ve alt bölgelerinin mikroyapıları, Resim 4.2'de ise püskürtme mesafesinin gözenekliliğe etkisi görülmektedir.



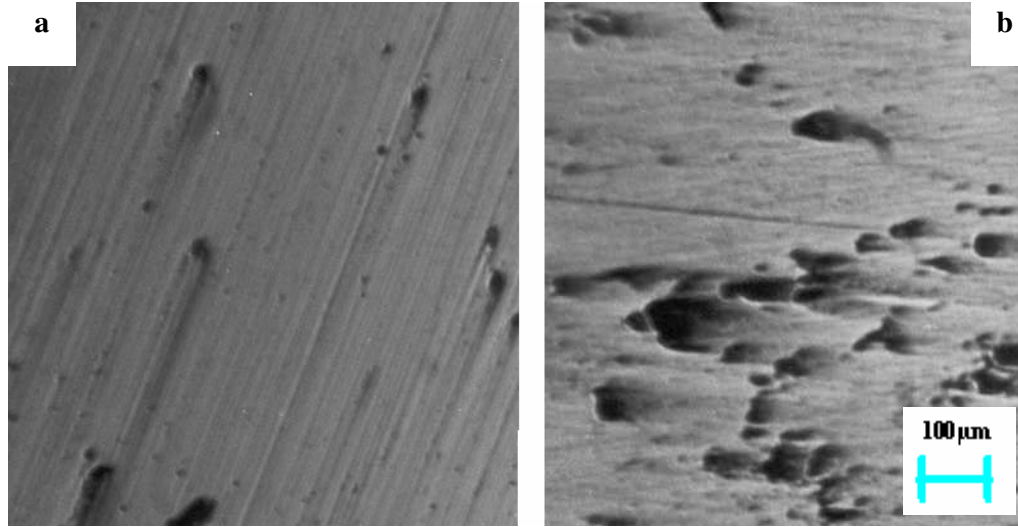
Şekil 4.4. PŞ ile üretilen parçaların şekli

Daha sonra tane sınırlarını görmek için parçalar Keller (%95 H₂O–%2.5 HNO₃–%1.5 HCl–%1 HF) dağlayıcısı ile dağlanmış ve optik mikroskopta tekrar fotoğrafları çekilmiştir (Resim 4.3).

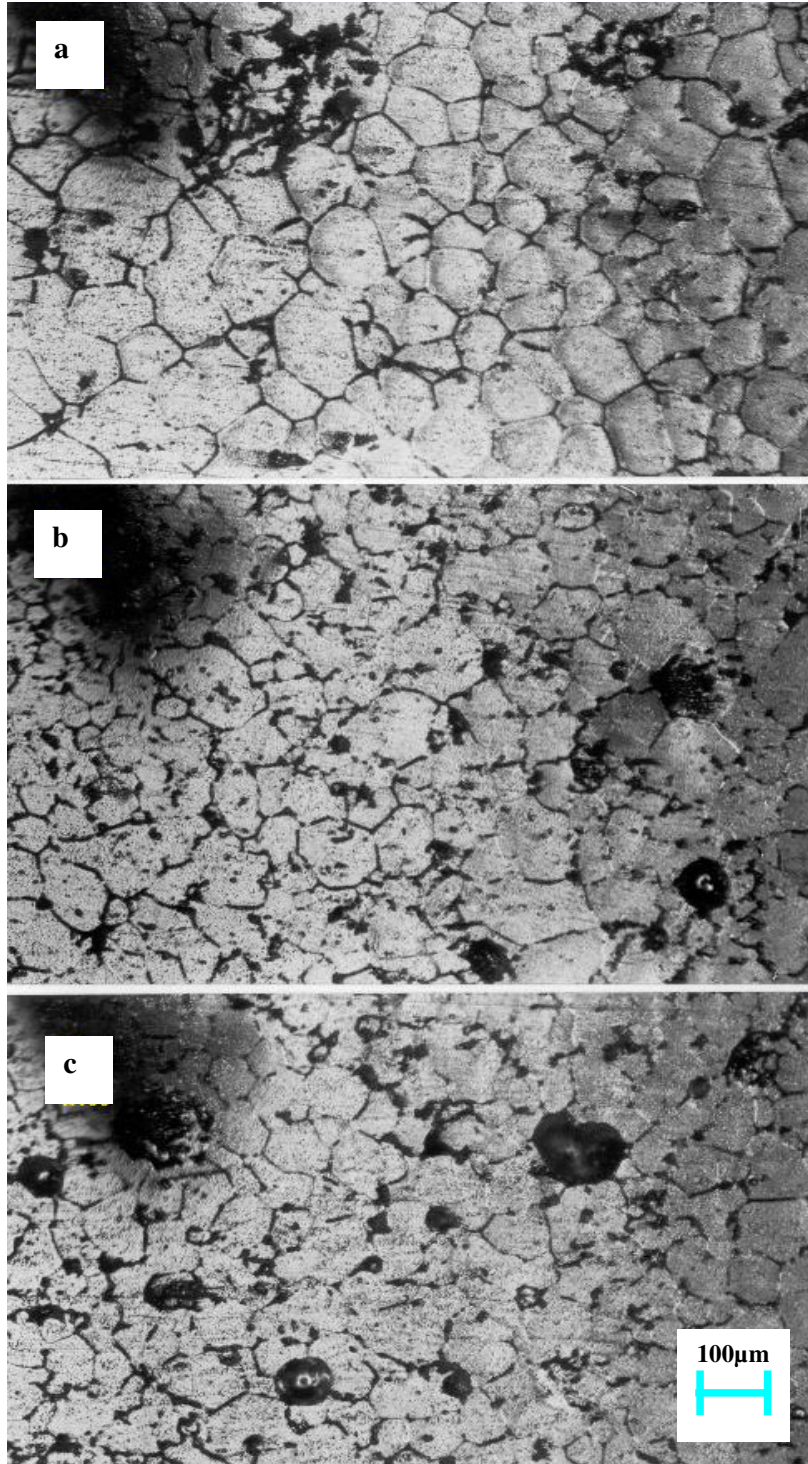
PŞ parçalarda mikroyapıya bakıldığında; genel olarak tabana yakın bölgelerde gözenek miktarının daha fazla olduğu (Resim 4.1), üst ve orta kısımlarda daha büyük olan tane yapısının, tabana doğru bir miktar küçüldüğü (Resim 4.3) görülmektedir. Gaz basıncı sabitken püskürtme mesafesi değiştirilerek yapılan deneylerde mesafenin artmasıyla gözenek sayısının ve büyüklüğünün arttığı görülmektedir (Resim 4.2).



Resim 4.1. 3 nolu PŞ parçasının dağlanmamış mikroyapısı (x100)
a) Üst bölge b) Alt bölge



Resim 4.2. PŞ parçalarda püskürtme yüksekliğinin etkisi (dağlanmamış)
a) H=115mm P=10bar b) H=135mm P=10bar



Resim 4.3. 3 nolu PŞ parçanın mikroyapısı (dağlanmış), x100
a) Üst bölge b) Orta bölge c) Alt bölge

Yoğunluk Ölçümü: PŞ parçaların yoğunlukları TS 2305'e göre ölçülmüştür. Yoğunluk ölçümü için %5'lik parafin mumu içeren kloroform çözeltisine deney parçası batırılmak suretiyle suyun ıslatmadığı bir yüzeyle kaplanmış olur. Daha sonra deney parçasının kuruması beklenir. Kuru deney parçası önce havada, sonra suda tartılır. Deney parçasının yoğunluğu Denklem 4.1'e, % teorik yoğunluk ise Denklem 4.2'ye göre hesaplanır.

$$\rho = \frac{m_1 \times \rho_w}{m_2 - m_3} \quad (4.1)$$

$$\% \text{ Teorik yoğunluk} = \rho / \rho_{Al} \quad (4.2)$$

Burada;

ρ = Deney parçasının yoğunluğu

m_1 = Kuru deney parçasının havadaki kütlesi

m_2 = Kaplanmış deney parçasının havadaki kütlesi

m_3 = Kaplanmış deney parçasının sudaki kütlesi

ρ_w = Suyun yoğunluğu

$\rho_{Al} = 2.7 \text{ g/cm}^3$

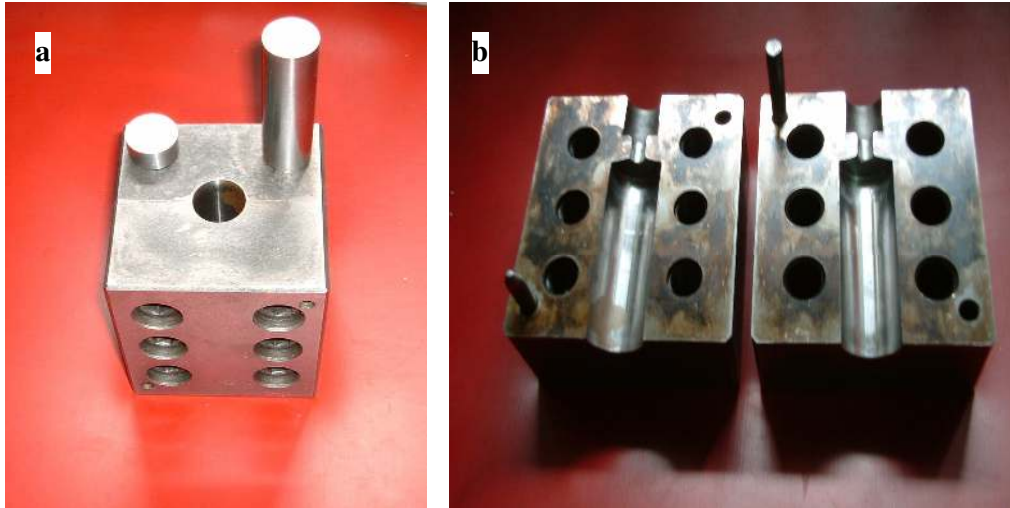
Çizelge 4.3. PŞ parçaların yoğunluk ölçüm sonuçları

Deney no	1	2	3	4	5	6	7
Gaz basıncı P (bar)	10	5	10	5	10	10	5
Püskürtme mesafesi H (mm)	90	110	115	122	135	140	145
% Teorik yoğunluk	91	88	88	80	78	75	70

4.3 Ekstrüzyon Deneyleri

Ekstrüzyon işlemi, hem döküm ve hem de PŞ alüminyum parçalara uygulanmıştır. Öncelikle parçalar, Resim 4.4’de gösterilen ekstrüzyon kalıbının giriş çapı olan 20mm’ye tornalanmıştır. Ekstrüzyon kalıbının giriş çapı (D_1) 20 mm, çıkış çapı (D_2) 6 mm ve kalıp boyu (L_1) 9.5 mm’dir. Deneyler için, Resim 4.5’de gösterilen 60 ton kapasiteli DARTEC marka hidrolik çekme-basma cihazı kullanılmıştır.

Ekstrüzyondan önce kalıbın içi alkol ile temizlenmiş ve çinko stearat ile yağlanmıştır. Yağlama işleminden sonra numuneler kalıba yerleştirilmiş ve ekstrüzyon işlemi genellikle ~650 MPa basınç gerçekleşmiştir. Sonuçta 6 mm çapında çubuklar elde edilmiştir (Resim 4.6). Her ekstrüzyon işlemi sonrasında kalıp açılıp yağlandıktan sonra tekrar kapatılmıştır. Ekstrüzyon sonucunda elde edilen çubuklardan kesilen numuneler bakalite alındıktan sonra (Resim 4.7), daha önce PŞ numunelerin metalografik olarak incelenmesi bölümünde anlatıldığı gibi zımparalama ve parlatma işlemleri uygulanmıştır. Ekstrüzyon yönüne dik ve ekstrüzyon yönüne paralel (eksenel düzlem) Hazırlanan numunelere dağlama işlemi uygulanmadan ve uygulanarak optik mikroskopta mikroyapılar incelenmiştir (Resim 4.8 – Resim 4.10).



Resim 4.4. Ekstrüzyon kalıbı a) Kapalı kalıp, alt ve üst zımba b) Açılmış haldeki kalıp



Resim 4.5. DARTEC hidrolik çekme-basma cihazı

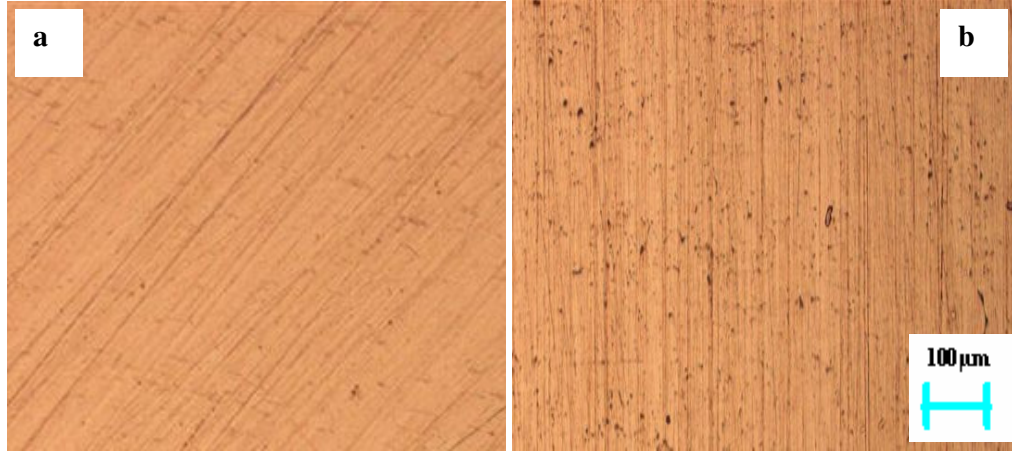


Resim 4.6. Ekstrüzyon sonrası elde edilen çubuklar

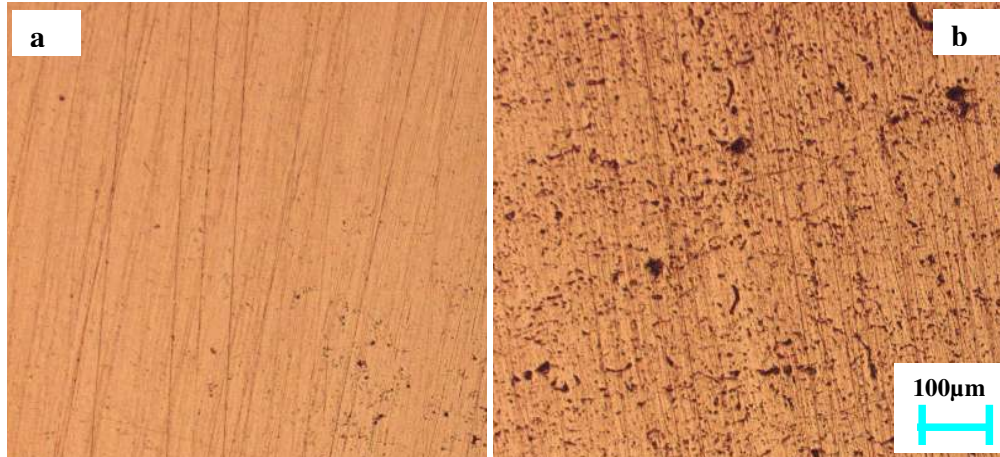


Resim 4.7. Bakalite alınmış numuneler

PŞ parçaların gözenek miktarlarının ekstrüzyon işleminde kapanarak önemli ölçüde azaldığı, ancak yüksek püskürtme mesafesinde üretilen PŞ parçalardan elde edilen ekstrüze çubukların düşük mesafelere göre daha çok gözenek içerdiği belirlenmiştir (Resim 4.8 ve Resim 4.9).

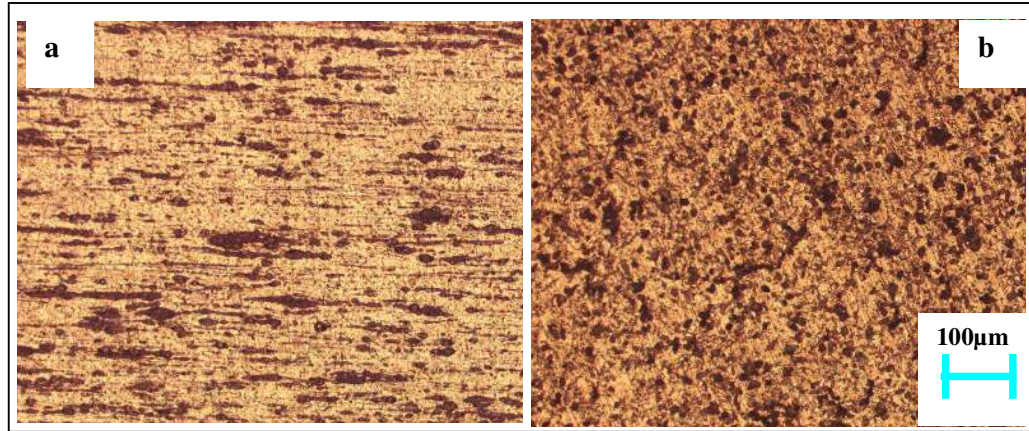


Resim 4.8. Ekstrüze PŞ alüminyumda gözenekler. P=10 bar, eksenel düzlem, dağlanmamış, x100 a) H=90 mm b) H=115 mm



Resim 4.9. Ekstrüze PŞ alüminyumda gözenekler. P=10 bar, eksene dik düzlem, dağlanmamış, x100 a) H=90 mm b) H=115 mm

Ekstrüzyon işlemi uygulanan parçalarda tanelerin aksel düzlemde uzadığı görülmüştür (Resim 4.10). Bu durum haddeleme ve ekstrüzyon gibi şekil verme yöntemleri, yeniden kristalleşme sıcaklığının altında soğuk olarak uygulandığında da karşılaşılan bir mikroyapı değişimidir. Çekme mukavemeti gibi mekanik özellikler tane uzaması yönünde daha yüksektir.



Resim 4.10. Ekstrüze PŞ aluminyumda mikroyapı. P=10 bar, dağlanmış, H=90 mm, x100 a) aksel düzlem b) eksene dik düzlem

Yoğunluk Ölçümü: PŞ+Ekstrüze parçaların yoğunlukları daha önce PŞ numunelerin yoğunluklarının ölçülmesi bölümünde anlatıldığı gibi TS 2305'e göre ölçülmüştür.

Yapılan yoğunluk ölçümleri sonucunda Çizelge 4. 4'teki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.4. PŞ + Ekstrüze parçaların yoğunluk ölçüm sonuçları

Deney parçası no	1	2	3	4	5	6	7
Gaz basıncı P (bar)	10	5	10	5	10	10	5
Püskürtme mesafesi H (mm)	90	110	115	122	135	140	145
% Teorik yoğunluk	99,3	97,8	96,5	95,2	96,3	96,3	94,6

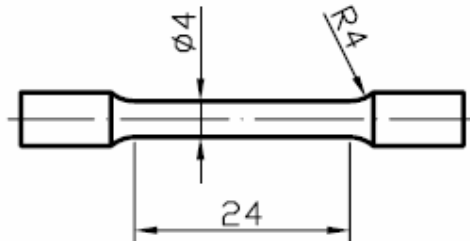
Sertlik Ölçümü: PŞ+Ekstrüzyon ve döküm parçaların mikrosertlikleri BUEHLER Micromet 5114 ile ölçülmüştür. Sertlik ölçümü Vickers sertlik cetveline göre yapılmıştır. Ölçümler 500 g yük ile yapılmıştır. Çizelge 4.5’de sertlik ölçümlerinin sonuçları görülmektedir.

Çizelge 4.5. Mikrosertlik ölçüm sonuçları

Numune	PŞ+ekstrüzyon						Döküm+ ekstrüzyon
No	1	2	3	4	5	6	8
Gaz basıncı P (bar)	10	5	10	5	10	10	-
Püskürtme mesafesi H (mm)	90	110	115	122	135	140	-
Eksenel düzlemdeki sertlik (HV)	43	41	38,5	47	46	48	44
Eksene dik düzlemdeki sertlik (HV)	45,7	45	42	47	53	45	41

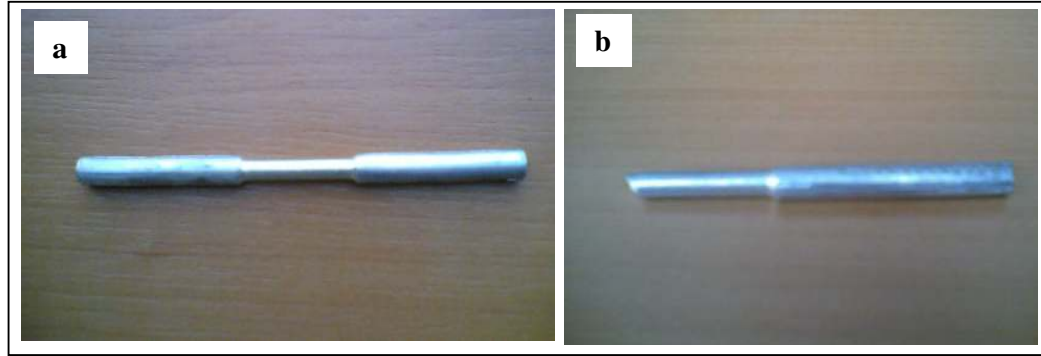
4.4 Çekme Testi

Öncelikle PŞ parçaların elde edildiği alüminyum kütükten ekstrüzyon işlemi uygulanmaksızın hazırlanan 3 adet numuneye, daha sonra da döküm ve PŞ alüminyum parçaların ekstrüzyon işleminden elde edilen çubuklardan ASTM E 8M-03’e göre hazırlanan numunelere (Şekil 4.5) çekme testleri uygulanmıştır.



Şekil 4.5. Çekme numunesi

Ekstrüzyon işlemi uygulanan döküm alüminyum kütükten hazırlanmış çekme numunesi sayısı 3; PŞ+ekstrüze çekme numunelerinin toplam sayısı ise, 7 farklı parametreyle yapılan PŞ deneylerinin her biri için 3 adet olmak üzere toplam 21'dir. Çekme testlerinde ekstrüzyon işleminde yararlanılan DARTEC hidrolik çekme-basma cihazı kullanılmıştır. Resim 4.11'de çekme numunesinin fotoğrafları görülmektedir.



Resim 4.11. a) Çekme numunesi b) Kopmuş numune

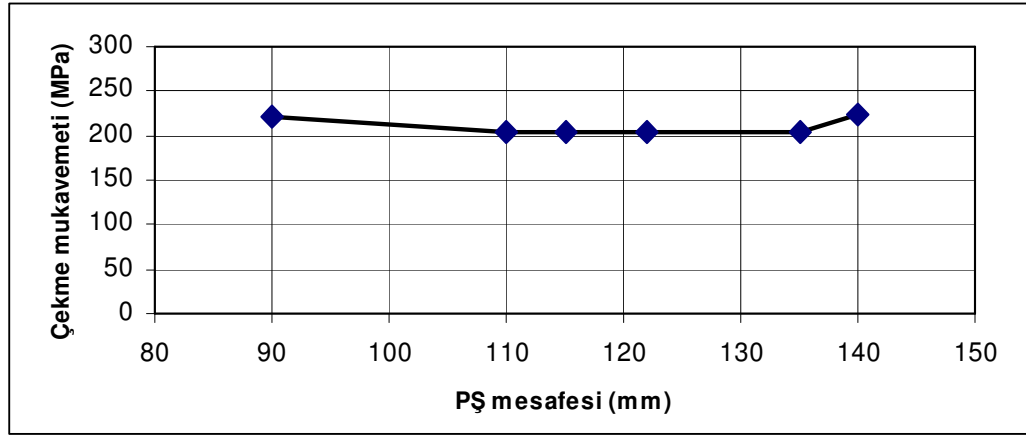
Her numune için yapılan 3 adet çekme testi sonucunda elde edilen değerlerin ortalaması alınarak Çizelge 4.6'da ortalama çekme mukavemeti olarak verilmiştir. Ayrıca % teorik yoğunluk ve sertlik değerleri de aynı çizelgede gösterilmektedir.

Çizelge 4.6. PŞ parçalar ile döküm parçaların yoğunluk, sertlik ve çekme testi Sonuçları

Uygulanan işlem	% Teorik yoğunluk (g/cm ³)	Ortalama çekme mukavemeti σ_{UTS} (MPa)	Sertlik (HV)	
			Eksenel düzlemde	Eksene dik düzlemde
PŞ (110/5) + ekstrüzyon	98,8	204	41	45
PŞ (122/5) + ekstrüzyon	97,4	204	47	47
PŞ (90/10) + ekstrüzyon	99,3	221	43	45,7
PŞ (115/10)+ ekstrüzyon	97,2	205	38,5	42
PŞ (135/10)+ ekstrüzyon	99,2	205	46	53
PŞ (140/10)+ ekstrüzyon	97,7	223	48	45
Döküm + ekstrüzyon	98,4	201	44	41
PŞ (145/5) + ekstrüzyon	94,6	Numuneler baş kısımlarından ezildiği için çekme testleri gerçekleştirilemedi.		

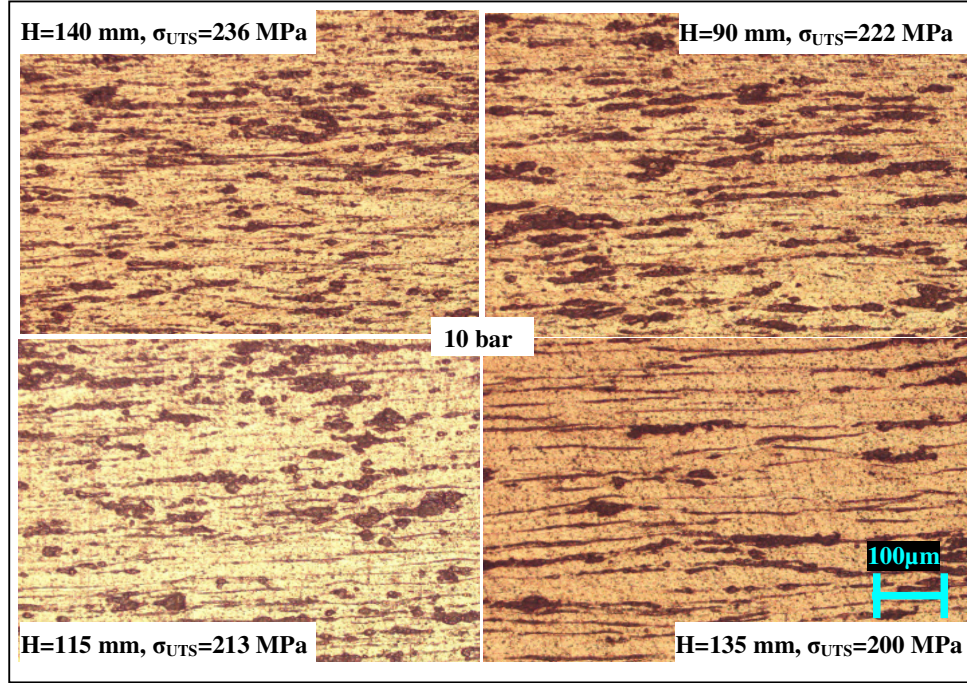
Çekme testleri sonucunda ekstrüze edilmemiş döküm numune için çekme mukavemetleri $\sigma_{UTS1} = 58 \text{ MPa}$ $\sigma_{UTS2} = 57 \text{ MPa}$ ve $\sigma_{UTS3} = 63 \text{ MPa}$ bulunmuştur. Bu değerlerin ortalaması alındığında $\sigma_{UTS} = 59 \text{ MPa}$ olmaktadır. Döküm numune için elde edilen bu değer PŞ + ekstrüzyon ve döküm + ekstrüzyon için elde edilen σ_{UTS} değerlerinden oldukça düşüktür.

Çizelge 4.6.'dan alınan çekme mukavemeti verileri ile oluşturulan grafik Şekil 4.6'da görülen grafik elde edilmiştir. Döküm malzemenin çekme testi sonucunda ortalama $\sigma_{UTS} = 201 \text{ MPa}$ olduğu görülmüştür. Bu değer PŞ parçaların maksimum çekme gerilmelerinin değerinden daha düşüktür. Çekme testinde kopan numunelerin optik mikroskop çalışmalarından elde edilen mikroyapılara örnekler Resim 4.12 - Resim 4.15' de; kırılma yüzeylerinin JEOL JSM 6360LV taramalı elektron mikroskopunda yapılan incelemelerine ait örnekler ise Resim 4.16 - 4.18'de verilmiştir.

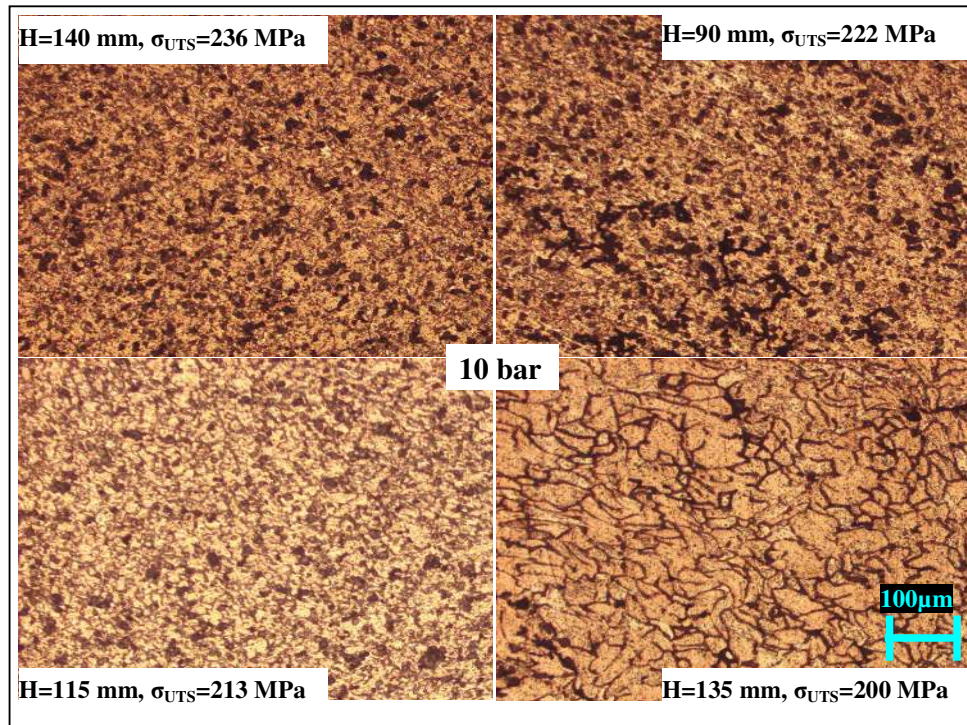


Şekil 4.6. Çekme mukavemetinin PŞ mesafesine göre değişimi

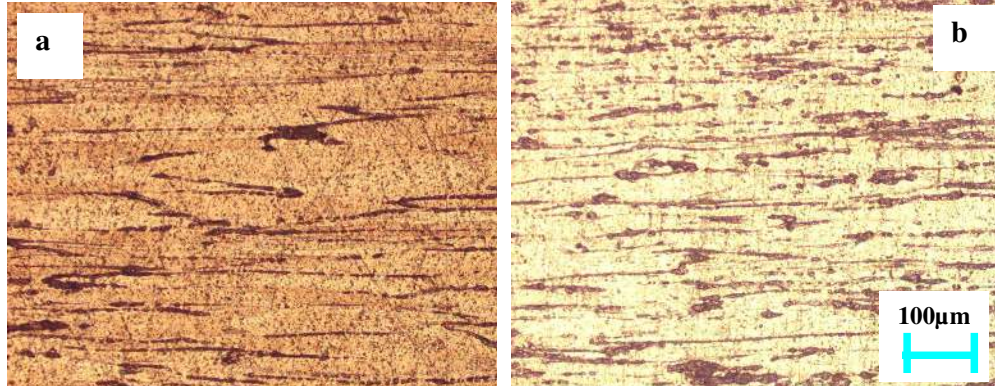
Kırılma yüzeylerinin taramalı elektron mikroskop incelemelerinden (Resim 4.16- Resim 4.18), küçük çukurcukların kırılmanın sünek tipte olduğu ve literatürle [14] uyum gösterdiği gözlenmiştir. Döküm+ekstrüze parçada ise bu durumun daha belirgin olduğu görülmektedir (Resim 4.21).



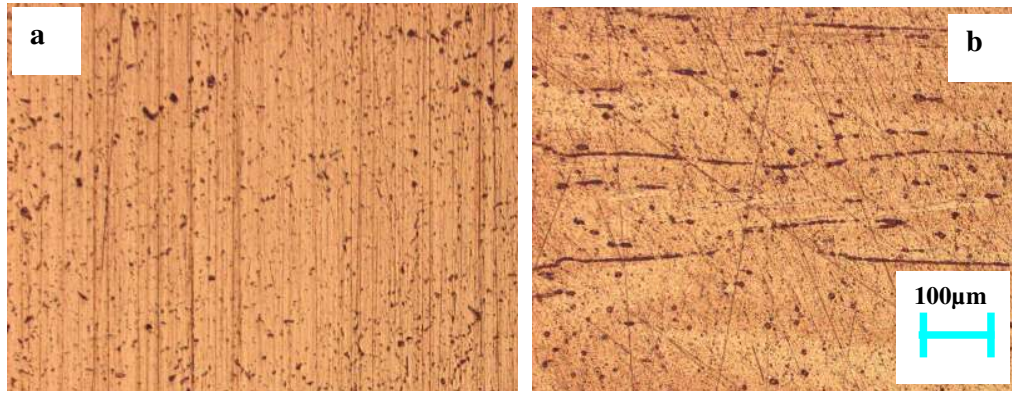
Resim 4.12. PŞ+ekstrüze numunelerde mikroyapı (eksenel düzlem)



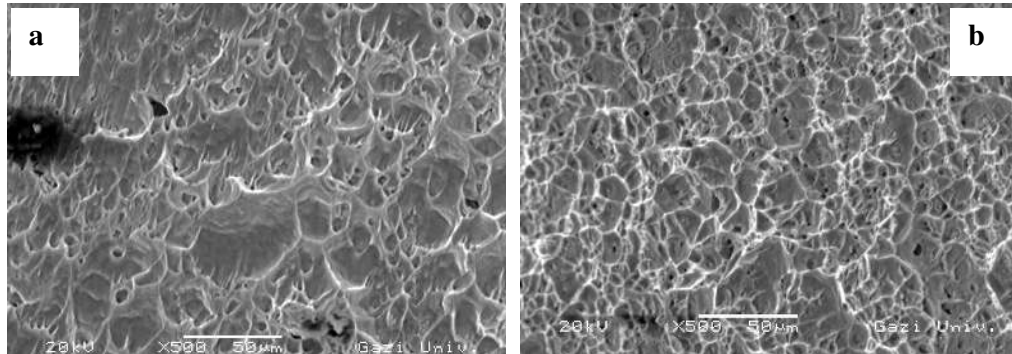
Resim 4.13. PŞ+ekstrüze numunelerde mikroyapı (eksene dik düzlem)



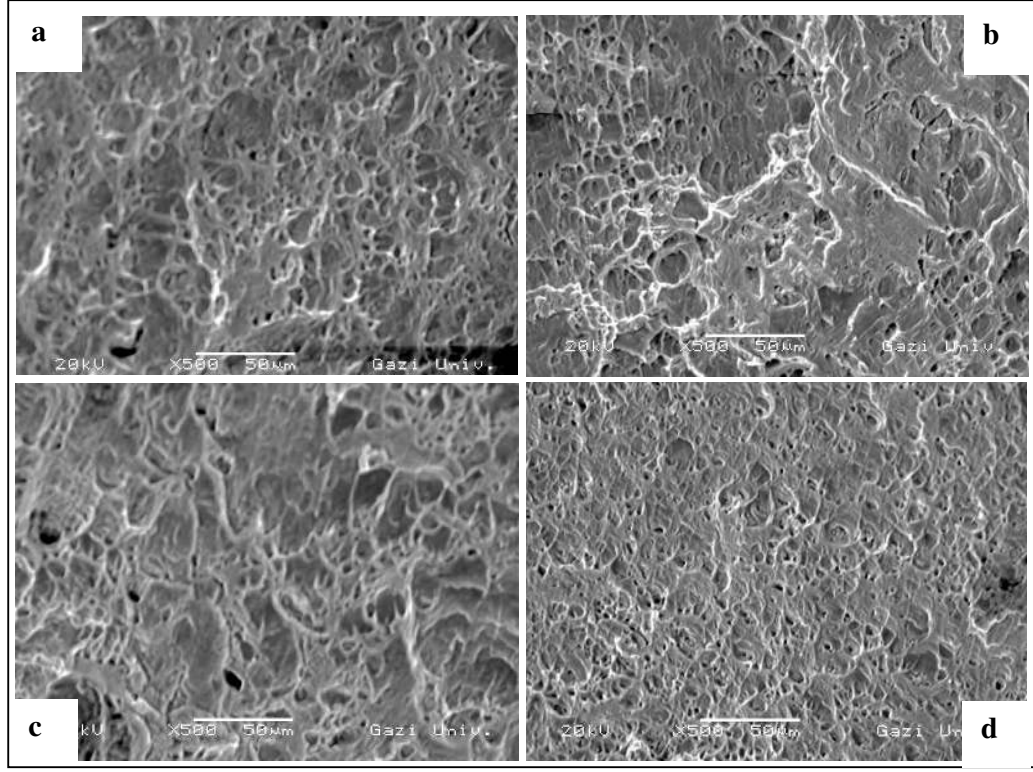
Resim 4.14. PŞ+ekstrüze numunelerde çekme testi sonrası mikroyapı. P=5 bar, eksenel düzlem, x100 a) H=110 mm, σ_{UTS} =189 MPa b) H=122 mm, σ_{UTS} =191 MPa



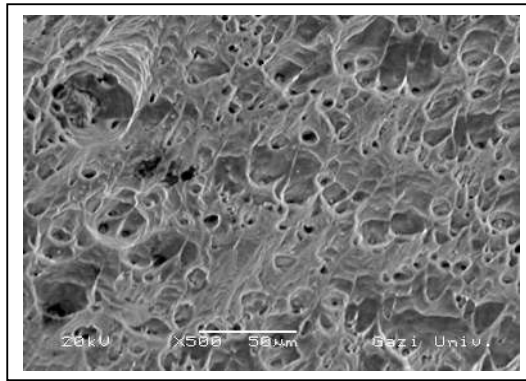
Resim 4.15. Döküm+ekstrüze numunelerde çekme testi sonrası mikroyapı. Eksenel düzlem, σ_{UTS} =185 MPa, x100 a) Dağlanmamış, b) Dağlanmış



Resim 4.16. PŞ+ekstrüze çekme numunelerinin kırılma yüzeylerine ait SEM resimleri, P=5 bar. a) H=110 mm, σ_{UTS} =189 MPa b) H=122 mm, σ_{UTS} =191 MPa



Resim 4.17. PŞ+ekstrüze çekme numunelerinin kırılma yüzeylerine ait SEM resimleri, P=10 bar. a) H=90 mm, σ_{UTS} =222 MPa b) H=115 mm, σ_{UTS} =213 MPa c) H=135 mm, σ_{UTS} =200 MPa d) H=140 mm, σ_{UTS} =236 MPa



Resim 4.18. Döküm+ekstrüze çekme numunesinin kırılma yüzeyine ait SEM resmi, σ_{UTS} =207 MPa

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

PŞ parça üretiminde 15° gaz çıkış açısına ve 75 mm^2 gaz çıkış alanına sahip Laval tipi nozulla atomizasyon işlemi gerçekleştirilmiş, atomizasyon değişkeni olan gaz basıncı 5 bar ve 10 bar seçilmiştir. PŞ değişkeni olan püskürtme mesafesi nozul altından itibaren 90 mm, 110 mm, 115 mm, 122 mm, 135 mm, 140 mm ve 145 mm olarak seçilmiştir. Seçilen basınç ve yükseklik değerleri ile 7 farklı şartta PŞ deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

1. PŞ parçalar için mikroyapıya bakıldığında; genel olarak tabana yakın bölgelerde gözenek miktarının daha fazla olduğu (Resim 4.1), üst ve orta kısımlarda daha büyük olan tane yapısının, tabana doğru bir miktar küçüldüğü (Resim 4.3) belirlenmiştir. Bu durum, PŞ işleminin ilk başında soğuk diske çarpan damlacıkların diske sıkıca tutunamamaları ve diske çarpınca basınçlı gaz akış alanı içinde kalmaları sebebiyle radyal olarak diskin dış kesimlerine doğru hareket etmelerinden kaynaklanmaktadır [7]. Ayrıca PŞ parçalarda üst yüzey sıcaklığının kritik bir parametre olması sebebiyle, tabana göre daha yüksek sıcaklığa sahip olan üst kısımlarda tane büyümesi olmaktadır [10]. Yaptığımız çalışmalarda PŞ parçanın yığıldığı diskin mesafesi deney süresince değişmediğinden parçanın üst yüzeylerini atomizasyon bölgesine yakınlaştırmakta, bu durumda da üst yüzey sıcaklığı artmaktadır.

2. Gaz basıncı sabit tutulup püskürtme mesafesi değiştirilerek yapılan deneyler sonucunda mesafenin artmasıyla gözenek sayısının ve gözenek miktarının arttığı görülmüştür (Resim 4.2). PŞ işleminde gözenekliliğin önlenememesine yapı içinde hapsolan atomizasyon gazının neden olduğu bilinmektedir [12]. Dolayısıyla daha büyük püskürtme mesafelerinde, atomize olan sıvı alüminyumun disk üzerinde yığıldığı andaki viskozitesinin düşük püskürtme mesafelerine göre daha yüksek olacağı, böylece yapı içinde atılamadan kalan daha fazla miktardaki atomizasyon gazının gözenekliliği arttırdığı söylenebilir.

3. PŞ ve döküm numuneler ekstrüzyona tabi tutularak 6 mm çapında çubuklar üretilmiştir (Resim 4.6). Ekstrüze çubuklardan hazırlanan numunelerin metalografik

incelemelerinden, PŞ parçaların gözenek miktarlarının ekstrüzyon işleminde kapanarak önemli ölçüde azaldığı, ancak yüksek püskürtme mesafesinde üretilen PŞ parçalardan elde edilen ekstrüze çubukların düşük mesafelere göre daha çok gözenek içerdiği burada da gözlenmiştir (Resim 4.8 ve Resim 4.9). PŞ numunelerle (Resim 4.3) karşılaştırıldığında, ekstrüzyon işlemi uygulanan parçalarda tanelerin eksenel düzlemde uzadığı görülmüştür (Resim 4.10). Bu durum haddeleme ve ekstrüzyon gibi şekil verme yöntemleri, yeniden kristalleşme sıcaklığının altında soğuk olarak uygulandığında da karşılaşılan bir mikroyapı değişimidir. Ekstrüze PŞ parçalarda da doğal olarak meydana gelen böyle bir yapı (Resim 3.3) anizotropik özelliktedir ve çekme mukavemeti gibi mekanik özellikler tane uzaması yönünde daha yüksektir.

4. Hem döküm+ekstrüzyon hem de PŞ+ekstrüzyon çubuklardan hazırlanan numunelere uygulanan çekme testlerinden $H=145$ mm ve $P=5$ bar PŞ şartlarında üretilen numunelere ait olanlar, test numunelerinin baş kısımlarında ezilme meydana gelmesi nedeniyle gerçekleştirilememiştir. Numunelerde kopma, numune eksenine 45° açı yapan bir düzlemde meydana gelmiştir (Resim 4.11.b).

5. Ekstrüze edilmiş PŞ ve döküm parçaların çekme mukavemetleri (~200 MPa), ekstrüze edilmemiş döküm alüminyum kütükten hazırlanmış numunelerin çekme mukavemetinden (59 MPa) yaklaşık 4 kat daha fazla olarak elde edilmiştir.

6. Yapılan testler PŞ işleminin döküm işlemine göre mukavemet değerlerini iyileştirdiğini literatürle de [14] uyumlu bir şekilde göstermiştir. Hiçbir PŞ+ekstrüze alüminyum numunenin ortalama çekme mukavemeti, döküm+ekstrüze numuneninkinden daha düşük çıkmamıştır (Çizelge 4.6). En yüksek ortalama çekme mukavemeti değeri, 140 mm püskürtme mesafesi ve 10 bar atomizasyon basıncı ile elde edilen PŞ parçadan 223 MPa olarak elde edilmiştir. Döküm+ekstrüze parça için ise bu değer, 201 Mpa'dır. 110-135 mm püskürtme mesafesi aralığında 204 ve 205 Mpa olarak belirlenen ortalama çekme mukavemeti değerlerinde önemli bir değişim olmadığından, Şekil 4.6 basıncın etkisi ihmal edilerek verilmiştir.

7. 10 bar atomizasyon basıncıyla yapılan PŞ çalışmalarına ait parçalardan ekstrüzyon sonrası testleri gerçekleştirilen çekme numunelerinin test sonu mikroyapıları (Resim 12 – Resim 13) ile 5 bar basınca ait çekme numunelerinin test sonu mikroyapıları (Resim 14), daha büyük tane yapılarında çekme mukavemetinin düştüğünü açıkça ortaya koymaktadır. Düşük mukavemete sahip döküm+ekstrüzyon numunelerinde ise daha fazla gözenek mevcut olup, tane yapısı da PŞ+ekstrüze parçalara göre daha kabadır (Resim 4.15).

8. Kırılma yüzeylerinin taramalı elektron mikroskop incelemelerinden (Resim 4.16- Resim 4.17), küçük çukurcukların kırılmanın sünek tipte olduğu ve literatürle [14] uyum gösterdiği gözlenmiştir. Döküm+ekstrüze parçada ise bu durum daha belirgindir (Resim 4.18).

Bundan sonra, artan gaz basıncının alüminyum toz boyutunu çok önemli miktarlarda azalttığı [3] ve düşük gaz/metal debisi oranında üretilen parçaların daha fazla gözenek içereceği [21] göz önüne alınıp daha yüksek atomizasyon basınçlarında PŞ çalışmaları yapılarak, PŞ parçaların tane yapılarının daha da küçültülmesi sağlanıp, mukavemet değerlerinin nasıl etkilendiği araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. German R.M, “Powder Metallurgy Science 2nd ed.”, *MPIF*, NJ, A.B.D.,16-20 (1984).
2. TTMD web, “Toz Metalurjisi Üretim Teknikleri”, <http://www.turkishpm.org> (2005).
3. Uslan, İ., “Gaz Atomize Aluminyum Tozlarının Özelliklerine Üretim Değişkenlerinin Etkisinin Araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 26-77 (1999).
4. Lawley, A., “The Science, Technology and Applications of Spray Forming”, *1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı Kitabı*, Türk Toz Metalurjisi Derneği, Gazi Üniversitesi, Ankara, 1-19 (1996).
5. Singer, A.R.E., “The Principles of Spray Rolling of Metals”, *Metall Mater*, 4: 246-250 (1970).
6. Brooks, R.G, Moore C., Leatham A.G., Coombs J.S., “Osprey Process”, *Powder Metallurgy*, 2: 100-102 (1977).
7. Cai., W.D., Smugeresky, J., Lavernia, E.J., “Low-Pressure Spray Forming of 2024 Aluminum Alloy”, *Material Science and Engineering A*, 241 (1-2): 60-71 (1998).
8. Singer, A.R.E., “Recent Developments in the Spray Forming of Metals”, *International Journal of Powder Metallurgy and Powder Technology*, 21 (3): (1985).
9. A. Leatham, “Introduction to Spray Forming: Alloys, Products, and Markets”, *4th ICSF*, Baltimore, A.B.D., 1-13 (1999).
10. Lavernia, E., Gutierrez-Miravete, E., And Trapaga, G., “Heat Transfer and Solidification Behaviour During Spray Atomisation and Deposition of Low Carbon Steels”, *Modern Developments in Powder Metallurgy*, 19: 457-473, (1988).
11. Takahara, T., “Properties of Al-High Si Alloys Produced by Spray Forming Process and its Application”, *EURO PM’95 Spray Forming*, Birmingham, 143-149 (1995).
12. Müller, H. R., Ohla, K., Zauter, R., And, Ebner, M., “Effect of reactive elements on porosity in spray-formed copper-alloy Billets”, *Materials Science and Engineering A*, 383 (1): 78-8 (2004)

13. Lee, J., Jung J. Y., Lee, E., Park, W. J., Ahn, S. And Kim N. J, “Microstructure and properties of titanium boride dispersed Cu alloys fabricated by spray forming”, *Materials Science and Engineering A*, 277 (1-2): 274-28 (2000).
14. Srivastava, V.C., Mandal, R.K., Ojha, S.N, “Microstructure and mechanical properties of Al-Si alloys produced by spray forming process”, *Materials Science and Engineering A*, 304-306, 555-558 (2001).
15. Wang, F., Yang, B., Duan, X. J., Xiong, B. Q., Zhzng, J. S., “The microstructure and mechanical properties of spray-deposited hypereutectic Al-Si-Fe alloy”, *Materials Science and Engineering A*, 277 (1-2): 274-28 (2000).
16. Zambon, A., Badan, B., Maddalena, A., “Production, microstructural and mechanical characterization of spray formed Al-6 wt.% Fe alloy and pre-nixed Al-6 wt.% Fe/SiC_p composite”, *Materials Science and Engineering A*, 375-377, 645-650 (2004).
17. Ha, T. K., Park, W. J., Ahn, S. and Chang, Y. W., “Fabrication of spray-formed hypereutectic Al–25Si alloy and its deformation behavior”, *Journal of Materials Processing Technology*, 130-131, 691-692 (2002).
18. Yu, F., Dwarakadasa, D. S., Ranganathan, S., “Microstructure and Mechanical Properties of Al-Si-Pb alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, 137: 164-167 (2003).
19. Chare, P.J.M., and Sheppard, T., “Densification and Properties of extruded Al-Zn-Mg atomised powder”, *International Journal of Powder Metallurgy and Powder Technology*, 10 (3): 203 (1974).
20. Austen, A. R., (Innovare Inc, Bethlehem, PA, USA); Hutchinson, W. L.; Feilbach, W. H., Source: *Metal Powder Report*, 41 (4): 294-298 (1986).
21. Seok, H. K., Lee, J. C. and Lee, H. I., “Extrusion of spray-formed Al–25Si–X composites and their evaluation”, *Journal of Materials Processing Technology*, 160 (3): 354-36 (2005).
22. Lianxi, H., Zuyan, L., Erde, W., “Microstructure and mechanical properties of 2024 aluminum alloy consolidated from rapidly solidified alloy powders”, *Materials Science and Engineering A*, 323, 213-217 (2002).
23. Arif, A. F. M., “On the use of non-linear finite element analysis in deformation evaluation and development of design charts for extrusion processes”, *Finite Elements in Analysis and Design*, 39: 1007-1021 (2003).

24. Onuh, S. O., Ekoja, M., Adeyemi, M. B., “Effects of die geometry and extrusion speed of aluminium and lead alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, 132: 247-285 (2003).
25. Murai, T., Matsuoka, S., Miyamoto, S., Oki, Y., “Effects of extrusion conditions on microstructure and mechanical properties of AZ31B magnesium and extrusions”, *Journal of Materials Processing Technology*, 141: 207-212 (2003).
26. Liu, Y., Li, J., Yang, G., Lu, Y., “High damping functional materials prepared by spray deposition”, *Journal of Materials Processing Technology*, 106: 94-98 (2000).
27. Siegert, K. and Huber, S., “Forming of spray formed copper alloys with injected carbon”, *Materials Science and Engineering A*, 326 (1): 63-7 (2002).
28. Yu, F., Dwarakadasa, D. S. and Ranganathan, S., “Microstructure and mechanical properties of spray-formed Al–Si–Pb alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, 37 (1-3): 164-167 (2003).
29. Su, Y. H. F., Chiang, C. S. S. and Tsao, C. Y. A., “Extrusion characteristics of spray-formed AC9A aluminum alloy”, *Materials Science and Engineering A*, 364 (1-2): 305-312 (2004).
30. Filho, W. J. B., Fogagnolo, J. B., Rodrigues, C. A. D., Kiminami, C. S., Bolfarini, C. and Yavari, A. R., “Consolidation of partially amorphous aluminium-alloy powders by severe plastic deformation”, *Materials Science and Engineering A*, 375-377, 936-941 (2004).
31. Chen, C. Y. and Tsao, C. Y. A., “Spray forming of silicon added AZ91 magnesium alloy and its workability”, *Materials Science and Engineering A*, 383 (1): 21-2 (2004).
32. Srivastava, A. K., Srivastava, V. C., Gloter, A. and Ojha, S.N., “Microstructural features induced by spray processing and hot extrusion of an Al–18% Si–5% Fe–1.5% Cu alloy”, *Acta Materialia*, 54 (7): 1741-1748 (2006).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : EKİCİ, Alparslan Afşın
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 24.02.1979 İstanbul
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 240 91 24
 Faks :
 e-mail : aaekici@yahoo.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2002
Lise	Hoca Ahmet Yesevi Lisesi	1996

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005-Devam Ediyor	Erenco-Erdemir	Proje Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Ekici, A. A., Uslan, İ., Sarıtaş, S., “Püskürtme Şekillendirme Alüminyum Parçaların Mikroyapısal İncelemesi”, *3. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı*, Ankara, 1356-1361, (2002).
2. Ekici, A. A., Uslan, İ., Sarıtaş, S., “Ekstrüzyonla Tam Yoğunlaştırılmış Püskürtme Şekillendirme Alüminyumun Mikroyapısal İncelemesi”, *4. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı*, Sakarya, 1279-1288, (2005).

Hobiler

Basketbol, voleybol, yüzme, gezi, müzik, kitap okumak