

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MELT SPINNING YÖNTEMİYLE AA6060 ALUMİNYUM ALAŞIMI TOZ VE
ŞERİT ÜRETİMİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Müh. Sefa Emre SÜNBÜL

ARALIK 2015

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MELT SPINNING YÖNTEMİYLE AA6060 ALUMİNYUM ALAŞIMI TOZ VE ŞERİT
ÜRETİMİNİN İNCELENMESİ**

Sefa Emre SÜNBÜL

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"METALURJİ VE MALZEME YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 08 / 12 / 2015

Tezin Savunma Tarihi : 24 / 12 / 2015

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Sultan ÖZTÜRK

Trabzon 2015

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında
Sefa Emre SÜN BÜL Tarafından Hazırlanan**

**MELT SPİNNİNG YÖNTEMİYLE AA6060 ALUMİNYUM ALAŞIMI TOZ VE ŞERİT
ÜRETİMİNİN İNCELENMESİ**

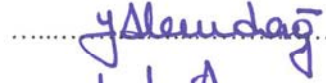
başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 08 / 12 / 2015 gün ve 1630 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

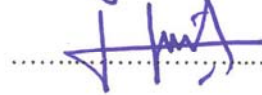
Başkan : Prof. Dr. Sultan ÖZTÜRK



Üye : Doç. Dr. Yasin ALEMDAĞ



Üye : Doç. Dr. Hakan ADATEPE



Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Melt spinning yöntemi ile eşeksenli, mikro, nano boyutlu ve amorf yapılar elde edilebilmektedir. Bu sayede malzemenin mukavemeti, aşınma dayanımı, korozyon dayanımı, elektriksel iletkenlik gibi özellikler geliştirilebilir. Bu özelliklerin iyileştirilmesinden dolayı melt spinning ile üretilen malzemeler, başta otomotiv sektörü olmak üzere tıp ve medikal, havacılık, uzay ve elektronik sektöründe kullanılır. Melt spinning ile başta manyetik ve şekil bellekli malzemeler olmak üzere çeşitli alüminyum, bakır ve nikel alaşımlı malzemeler üretilir.

Melt spinning yöntemi bir hızlı katılaştırma tekniğidir. Teknolojinin ilerlemesi ile birlikte, hızlı katılaştırma teknolojisi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Hızlı katılaştırma teknolojileri arasında melt spinning tekniği diğer hızlı katılaştırma tekniklerinden daha üstündür. Bu üstünlüğün temel sebebi ise diğer tekniklerle elde edilemeyen soğuma hızlarına ulaşılmasıdır.

Bu çalışmada melt spinning metoduyla AA6060 alüminyum alaşımı toz ve şeritleri üretilmiştir. Bu kapsamda melt spinning işlem parametrelerinin elde edilen toz ve şeritlerin özelliklerine etkileri ayrıntılı olarak çalışılmıştır. Ayrıca üretilen toz ve şeritlerin mikroyapıları incelenmiş, soğuma hızları belirlenmiştir.

Bu çalışma boyunca tecrübesiyle bana yol gösteren danışman hocam Prof. Dr. Sultan ÖZTÜRK' e teşekkür ederim. Her türlü desteği sağlayan hocam Doç. Dr. Bülent ÖZTÜRK' e, iş arkadaşlarım Arş. Gör. Murat EROĞLU, Arş. Gör. Kürşat İCİN, Arş. Gör. Zafer GÖLBAŞI, Abdürrahim METOĞLU, Deha Emre KANAR'a ve ustam Süleyman TONBUL' a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca sürekli yanımda olup maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen başta sevgili eşim Hazal Vecide SÜNBÜL olmak üzere kardeşim Ahmet Turan SÜNBÜL, aileme ve sevdiklerime sonsuz teşekkür ederim.

Sefa Emre SÜNBÜL
Trabzon, 2015

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Melt Spinning Yöntemiyle AA6060 Alüminyum Alaşımı Toz Ve Şerit Üretiminin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Sultan ÖZTÜRK’ ün sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 24/12/2015

Sefa Emre SÜNBÜL

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Melt Spinning Tekniği.....	6
1.3. Melt Spinning Yönteminin Çalışma Prensibi.....	7
1.4. Şerit Oluşum Mekanizması	9
1.5. Melt Spinning İşlem Parametreleri.....	10
1.5.1. Disk Hızı.....	11
1.5.2. Püskürtme Basıncı	13
1.5.3. Sıvı Metal Sıcaklığı	15
1.5.4. Alaşım Kompozisyonu (Element Etkisi).....	16
1.5.5. Nozul Şekli ve Boyutu.....	17
1.5.6. Nozul – Disk Arası Mesafe.....	17
1.5.7. Kullanılan İnert Gaz Çeşitleri	18
1.5.8. Melt Spinning Atmosferi	19
1.5.9. Nozulun Disk Yüzeyi ile Yaptığı Açısı.....	19
1.5.10. Nozul Uçunun Açısı	20
1.5.11. Disk Malzemesi, Disk Çapı ve Yüzey Durumu.....	21
1.6. Melt Spinning Yönteminde Soğuma Hızı	22
1.7. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı	25
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	27

2.1.	Kullanılan Alaşım.....	27
2.2.	Kullanılan Melt Spinning Sistemi Ünitesi.....	28
2.3.	Melt Spinning Sistemi ile Farklı Parametrelerde şerit ve Toz Üretimi	30
2.4.	şerit Kalınlıklarının Ölçümleri ve Ortalama Toz Boyutu Hesaplamaları	33
2.5.	Üretilen şerit ve Tozların Morfoloji ve Mikroyapı İncelemeleri	34
3.	BULGULAR VE İRDELEME	35
3.1.	Melt Spinning Parametrelerinin Ortalama şerit Kalınlığına Etkisi.....	35
3.2.	Üretilen şeritlerin Mikroyapıları	41
3.3.	Üretilen Tozların Morfolojileri.....	45
3.4.	Üretim Parametrelerinin Boyut Dağılımına ve Ortalama Toz Boyutuna Etkisi.....	52
3.5.	Üretilen Tozların Mikroyapıları	61
4.	SONUÇLAR.....	69
5.	ÖNERİLER.....	71
6.	KAYNAKLAR	72
	ÖZGEÇMİŞ.....	83

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

MELT SPINNING YÖNTEMİYLE AA6060 ALUMİNYUM ALAŞIMI TOZ VE ŞERİT
ÜRETİMİNİN İNCELENMESİ

Sefa Emre SÜN BÜL

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Sultan ÖZTÜRK

2015, 83 Sayfa

Bu çalışmada alüminyum AA6060 alüminyum alaşımı melt spinning yöntemi ile yüksek vakum altında pürüzsüz disk ile hızlı katılaştırılmış şerit ve dokulu disk ile toz üretimi gerçekleştirilmiştir. Disk hızı, püskürtme basıncı, sıvı metal sıcaklığı (aşırı ısıtma miktarı), nozul – disk mesafesi ve nozul genişliği gibi melt spinning parametrelerinin üretilen şeritlerin kalınlıklarına, morfoloji ve mikroyapılarına etkileri incelenmiştir. Bununla birlikte parametrelerin dokulu disk ile üretilen tozların ortalama toz boyutuna, morfolojilerine ve mikroyapılarına etkileri incelenmiştir. Ayrıca üretilen şerit ve tozların mikroyapıları incelenerek soğuma hızları hesaplanmıştır.

Melt spinning sisteminde pürüzsüz disk kullanılarak 28-171 µm kalınlıklarda 4-8 mm genişliklerde ve 1-2 m boylarında şeritler üretilmiştir. Ortalama şerit kalınlığının artan disk hızı, sıvı metal sıcaklığı ve azalan püskürtme basıncı, nozul – disk mesafesi ve nozul genişliği ile azaldığı gözlenmiştir. Üretilen şeritlerin soğuma hızları $9,20 \times 10^3 - 0,96 \times 10^3$ K/s aralığında değişmiştir.

Dokulu disk kullanılarak yapılan deneylerde ise, melt spinning parametrelerine bağlı olarak 161 – 274 µm ortalama boyutta tozlar üretildi. Artan disk hızı ve aşırı ısıtma sıcaklığı ve azalan püskürtme basıncı ve nozul – disk mesafesi ile ortalama toz boyutunun azaldığı tespit edildi. Elde edilen tozların morfolojileri genellikle çubuksu, pulsulu, yapraklı ve düzensiz şekilde olduğu gözlenmiştir. Toz boyutlarına göre soğuma hızları $6,44 \times 10^2 - 1,58 \times 10^2$ K/s aralığında hesaplandı.

Anahtar Kelimeler: Melt Spinning, Şerit Üretimi, Toz Üretimi, Hızlı Katılaştırma, Parametre

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF PRODUCING AA6060 ALUMINIUM ALLOY POWDERS AND RIBBONS WITH MELT SPINNING METHOD

Sefa Emre SÜNBÜL

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Metallurgy and Materials Engineering
Supervisor: Professor Sultan ÖZTÜRK
2015, 83 Pages

In this study, AA6060 aluminium alloy powders and ribbons was produced with melt spinning technique in high vacuum atmosphere. Different types of wheels such as smooth and toothed wheels were used. The smooth wheel was used in production of ribbon and the effects of melt spinning parameters such as wheel speed, ejection pressure, ejection temperature (superheat), nozzle – wheel gap and nozzle width on the properties of ribbons in terms of ribbon thickness, morphology and microstructure were investigated. On the other hand, AA6060 powders were produced by using toothed wheel and the effects of process parameters on the mean particle size, morphology and microstructure of produced powders were studied.

In the present study, ribbons of 28 - 171 μm thickness, 4 – 8 mm width and 1-2 m length were produced by using smooth wheel. The ribbon thickness decreased with increasing wheel speed, ejection temperature, decreasing ejection pressure, nozzle-wheel gap and nozzle width. Cooling rates of produced ribbons were in the range of $9,20 \times 10^3$ - $0,96 \times 10^3$ depending on ribbon thickness.

The mean particle sizes of produced powders using toothed wheel were in the range of 161-274 μm depending on process parameters. The mean particle size of powders decreased with increasing wheel speed, superheat and decreasing ejection pressure and nozzle-wheel gap. The shapes of produced powders were in the shapes of ligamental, flake and irregular. Cooling rates of produced powders were in the range $6,44 \times 10^2$ – $1,58 \times 10^2$ depending on the mean particle size.

Key Words: Melt Spinning, Ribbon Production, Powder Production, Rapid Solidification, Parameter

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Melt spinning sisteminin şematik görünümü	6
Şekil 2. Şerit oluşum prosesi (a) Düşük disk hızı (1 m/s) ve kalın şerit (300 µm), (b) yüksek disk hızı (30 m/s) ve ince şerit (20 µm) [45].	10
Şekil 3. Melt spinning prosesinde etkili olan bazı parametrelerin şematik gösterimi [68].	11
Şekil 4. Napolitano ve Mecco' nun disk hızı - şerit kalınlığı grafiği [67].	12
Şekil 5. Akdeniz ve Wood' un disk hızı - şerit kalınlığı grafiği [77].	13
Şekil 6. Tkatch vd.' nin püskürtme basıncı - kalınlık ve sıvı metal sıcaklığı - kalınlık grafiği [80].	14
Şekil 7. Sohrabi vd.' nin püskürtme basıncı - şerit kalınlığı grafiği [81].	14
Şekil 8. Nakagawa vd.' nin şerit kalınlığı ve sıvı metal sıcaklığına göre değişim gösteren eğriler [88].	15
Şekil 9. Kim ve Nam' ın sıvı metal sıcaklığı ile şerit kalınlığı ve genişliği grafiği [86].	16
Şekil 10. Srinivas vd.' nin nozul - disk arası mesafe - şerit kalınlığı ve uzunluğu grafiği [82].	18
Şekil 11. Eriyiğin püskürtme açısının şematik gösterimi [45].	20
Şekil 12. Melt spinning prosesinde kullanılan nozul geometrisi [110].	21
Şekil 13. Lee vd.' nin Al-Cu alaşımı mikroyapısı [112].	23
Şekil 14. Karaköse ve Keskin'in Al-%3Fe alaşımı için elde ettikleri mikroyapı [10].	24
Şekil 15. AA6060 alüminyum alaşımı faz diyagramı	27
Şekil 16. Kullanılan melt spinning ünitesinin şematik resmi. 1-Disk, 2-Nozul, 3-İndüksiyon bobini, 4-Potanın mesafe ayarlama yeri, 5-Dış kapak, 6-Turbomoleküler vakum, 7-Vakum pompası, 8-İndüksiyon ısıtma ünitesi	28
Şekil 17. Melt spinning cihazı	29
Şekil 18. Üretilen AA6060 alüminyum alaşımı şeritler (a.DH30, b. PB0,6, c. NDM3, d. SMS800 kodlu numune)	37
Şekil 19. Üretilen şeritlerin disk ile temas eden yüzeylerinin görüntüsü	37
Şekil 20. Üretilen şeritlerin hava ile temas eden yüzeyinin görüntüsü	38
Şekil 21. Disk hızının şerit kalınlığına etkisi (PB: 1bar, NDM: 1mm, SMS: 750°C, NG: 0,5mm sabit tutulmuştur)	38
Şekil 22. Şerit kalınlığının püskürtme basıncıyla değişimi (DH: 38m/s, NDM: 1mm, SMS: 750°C, NG: 0,5mm sabit tutulmuştur)	39

Şekil 23. Sıvı metal sıcaklığının şerit kalınlığına etkisi (DH: 38m/s, PB: 1bar, NDM: 1mm, NG: 0,5mm sabit tutulmuştur).....	39
Şekil 24. Nozul-disk arası mesafe ile şerit kalınlığının değişimi (DH: 46 m/s, PB: 1 bar, SMS: 700°C, NG: 0,6mm).....	40
Şekil 25. Şerit kalınlığının nozul genişliği ile değişimi (DH: 38m/s, PB: 1bar, NDM: 1mm, SMS: 750°C).....	40
Şekil 26. AA6060 alüminyum alaşımı şeridi mikroyapısı (şerit kalınlığı 30 µm)	41
Şekil 27. AA6060 alüminyum alaşımı şeridi mikroyapısı (şerit kalınlığı 41 µm)	42
Şekil 28. AA6060 alüminyum alaşımı şeridi mikroyapısı (şerit kalınlığı 50µm)	42
Şekil 29. AA6060 alüminyum alaşımı şeridi mikroyapısı (şerit kalınlığı 60µm)	43
Şekil 30. AA6060 alüminyum alaşımı şeridi mikroyapısı (şerit kalınlığı 92µm)	43
Şekil 31. AA6060 alüminyum alaşımı şeritlerde şerit kalınlığına bağlı tane boyutu değişimi.....	44
Şekil 32. AA6060 alüminyum alaşımı şeritlerde şerit kalınlığı ile soğuma hızı değişimi.....	45
Şekil 33. Üretilen AA6060 alüminyum alaşımı (-45/+36) elek aralığı tozlar a)normal, b)büyütülmüş	46
Şekil 34. Üretilen AA6060 alüminyum alaşımı (-63/+45) elek aralığı tozlar a)normal, b)büyütülmüş	47
Şekil 35. Üretilen AA6060 alüminyum alaşımı (-90/+63) µm elek aralığı tozlar a)normal, b)büyütülmüş	48
Şekil 36. Üretilen AA6060 alüminyum alaşımı (-125/+90) µm elek aralığı tozlar a)normal, b)büyütülmüş	49
Şekil 37. Üretilen AA6060 alüminyum alaşımı (-180/+125) µm elek aralığı tozlar a)normal, b)büyütülmüş	50
Şekil 38. Üretilen AA6060 alüminyum alaşımı (-250/+180) µm elek aralığı tozlar a)normal, b)büyütülmüş	51
Şekil 39. Melt spinning ile üretilen tozların disk hızının a) frekans, b) kümülatif boyut dağılımına etkisi.....	54
Şekil 40. Disk hızının ortalama toz boyutuna etkisi	55
Şekil 41. Melt spinning ile üretilen tozların püskürtme basıncının a) frekans, b) kümülatif boyut dağılımına etkisi	56
Şekil 42. Püskürtme basıncının ortalama toz boyutuna etkisi	57
Şekil 43. Melt spinning ile üretilen tozların sıvı metal sıcaklığının a) frekans, b) kümülatif boyut dağılımına etkisi	58
Şekil 44. Sıvı metal sıcaklığının ortalama toz boyutuna etkisi.....	59
Şekil 45. Melt spinning ile üretilen tozların nozul-disk mesafesinin a) frekans, b) kümülatif boyut dağılımına etkisi	60
Şekil 46. Nozul - disk mesafesinin ortalama toz boyutuna etkisi.....	61

Şekil 47. AA6060 tozu mikroyapısı (46 µm)	62
Şekil 48. AA6060 tozu mikroyapısı (57 µm)	62
Şekil 49. AA6060 tozu mikroyapısı (72 µm)	63
Şekil 50. AA6060 tozu mikroyapısı (85 µm)	63
Şekil 51. AA6060 tozu mikroyapısı (98 µm)	64
Şekil 52. AA6060 tozu mikroyapısı (115 µm)	64
Şekil 53. AA6060 tozu mikroyapısı (127 µm)	65
Şekil 54. AA6060 tozu mikroyapısı (142 µm)	65
Şekil 55. AA6060 tozu mikroyapısı(161 µm)	66
Şekil 56. AA6060 tozu mikroyapısı (193 µm)	66
Şekil 57. AA6060 tozlarında toz boyutuna bağlı olarak tane boyutu değişimi.....	67
Şekil 58. AA6060 tozlarında tane boyutuna bağlı soğuma hızı değişimi	68
Şekil 59. AA6060 tozlarında toz boyutuna bağlı soğuma hızı değişimi	68

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Şerit oluşumunun farklı aşamalarında ısı transfer katsayıları ve çıkartılan ısı	10
Tablo 2. AA6060 alüminyum alaşımı kimyasal bileşimi (ASTM B221 – 14).....	27
Tablo 3. Melt spinning yöntemiyle pürüzsüz disk kullanılarak üretilen şeritlerin işlem parametreleri.....	32
Tablo 4. Melt spinning yöntemiyle dokulu disk kullanılarak üretilen tozların işlem parametreleri.....	33
Tablo 5. AA6060 alüminyum alaşımı şeritlerde şerit kalınlığına bağlı olarak tane boyutu ve soğuma hızının değişimi.....	44
Tablo 6. AA6060 tozlarında toz boyutlarına bağlı olarak tane boyutu ve soğuma hızı değişimi	67

SEMBOLLER DİZİNİ

DH: Disk hızı

SMS: Sıvı metal sıcaklığı

PB: Püskürtme basıncı

NDM: Nozul ile disk arasındaki mesafe

NG: Nozul genişliği

Ş: Soğuma hızı

DAS: İkincil dentritik kol aralığı veya ortalama tane boyutu

ts: katılaştırma zamanı

ξ: şerit kalınlığı

ρ: yoğunluk

w: silisyum içeriği

L₁: alüminyum gizli ısı

L₂: silisyum gizli ısı

c: özgül ısı kapasitesi

T₁₀: şeridin sıcaklığı

T₂₀: soğuk diskin sıcaklığı

T_e: ötektik sıcaklığı

T_i: şerit ve disk ara yüzeyinin sıcaklığı

b₂: ısı depolama katsayısı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Melt spinning yöntemi, eriyik haline getirilmiş sıvı bir alaşımın, bir nozul vasıtasıyla termal iletkenliği yüksek bir metal disk üzerine belirli bir basınçla birlikte püskürtülmesi sonucu, damlacık veya toz şekline dönüşmesine izin verilmeden şerit şeklinde üretilmesidir [1].

Belirli bir miktar küçük parçalara ayrılmış metal alaşımı indüksiyon bobini ile çevrelenmiş bir potanın içine yerleştirilir. Uygulanan yüksek akım, potanın içindeki alaşımın sıcaklığının artmasına neden olur ve dolayısıyla alaşım erir. Erimiş metal genellikle argon gazı olmakla beraber bir soygaz ile hızla dönmekte olan ve genellikle bakır olan diske ince bir nozul vasıtasıyla püskürtülür ve şerit halinde elde edilir. Yapılan işlem bir tür hızlı katılaştırma işlemidir. Melt spinning yöntemi işle eş eksenli hücreli, nanokristalli ve amorf yapıları metal şeritler üretilmektedir [2].

Melt spinning ile üretilen şeritler, üretim parametrelerine bağlı olarak farklı kalınlıkta, genişlikte, uzunlukta ve mikroyapıda elde edilirler. Başta alaşım türü olmak üzere, disk hızı, püskürtme basıncı, nozul genişliği, nozul-disk arası mesafe, aşırı ısıtma miktarı ve sıvı metal püskürtme basıncı melt spinning yönteminde kullanılan parametrelerden bazılarıdır.

Malzeme geliştirme çalışmalarında melt spinning uygulamalarından elde edilen yüksek soğuma hızları oldukça yararlı olmuştur. Bu teknikte, metal ergiyik hızla dönen bakır disk üzerine akıtılır. Ergiyik disk üzerinde santrifüj kuvvetin etkisi ile incelerek hızlı katılmış şerit halinde savrulur. Elde edilen bu şeritler toz haline getirmek için öğütme işlemine tabi tutulurlar. Melt spinning yönteminde şerit üretiminin yanı sıra dokulu diskler kullanılarak doğrudan toz üretmek de mümkündür [3].

Hızlı katılaştırma çalışmalarında en yüksek soğuma hızı, ergiyik metalin soğutulmuş bir alt yüzeye basınçlı bir şekilde çarptırılmasıyla elde edilmektedir. Soğutulmuş alt yüzey malzemesi olarak yüksek ısı iletim katsayısına sahip saf bakır veya çeşitli bakır alaşımları (Cu-Be, Cu-Sn vb.) kullanılmaktadır. Sıvı metalden iyi bir ısı iletimi için disk yüzeyinin temiz ve pürüzsüz olması gerekir. Sıvı metal diske çarptığı anda, sıvı metal ile disk yüzeyi

temas noktasında sıvı metal banyosu oluşur. Hareket eden disk yüzeyi, metal banyosunu genişletir ve şerit oluşmaya başlar. Oluşmakta olan bu şerit dönen disk yüzeyi ile aynı hızda hareket etmeye başlar. Katılaştan şerit merkezkaç kuvvetin etkisiyle diskten ayrılır [4].

Melt spinning, şerit olarak isimlendirilen ince bant formlarındaki metalik cam alaşımları ve amorf metal üretmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, Duwez ve arkadaşları [5] tarafından 1960 yılında geliştirildi ve son elli yıldır çok sayıda ikili, üçlü ve çoklu amorf ve metalik cam alaşımların sentezlenip üretilmesini sağlamıştır [2].

Melt spinning tekniği ile alüminyum, titanyum, bakır, magnezyum, nikel alaşımı şeritleri ile manyetik ve şekil bellekli malzemeler üretilebilmektedir. Manyetik olarak temelde demir bazlı alaşımlar, şekil bellekli olarak ise genellikle nikel içeren bazı alaşımlar kullanılmaktadır. Özellikle katı çözünürlük sınırının genişlemesi ve mekanik özelliklerin iyileşmesinden dolayı melt spinning tekniği, alüminyum alaşımlarından şerit üretimi konusunda önemli hale gelmiştir. Al-Li ve Al-Si alaşımlarının melt spinning tekniği ile üretilmesinde Li ve Si elementlerinin katı haldeki çözünürlük sınırlarının genişlemesi melt spinning tekniğine olan ilgiyi arttırmıştır [6].

Alüminyum alaşımlarının mekanik işlem veya yaşlandırma ile özelliklerinin arttığı bilinmektedir. Bunun dışında melt spinning gibi işlemlerle de çeşitli özellikleri artırılabilir. Alüminyum alaşımları, yüksek erime sıcaklığı, düşük yoğunluk, yüksek oksidasyon direnci, artan sıcaklıkla akma dayanımının artması ve yüksek sertlik gibi özelliklerinden dolayı tercih edilmektedirler [6].

Melt spinning yöntemiyle üretilen alüminyum alaşımlarında neredeyse tüm özelliklerde iyileşme gösterdiği için özellikle uçak, havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılmakla beraber taşımacılık, otomotiv, bina ve yapı, enerji tüketimi, elektronik endüstrilerinde, motor parçaları, yarış motor parçaları, pistonlar, hidrolik parçaları, robot parçaları, tıbbi ürünler, spor aletleri üretiminde kullanılmaktadır. Kullanım amaçları genelde ağırlığı ve yoğunluğu azaltmak, yakıt tüketimini azaltmak, motor performansını arttırmak, mekaniksel özellikleri arttırmak, korozyon ve aşınma dirençlerini arttırmaktır [6-12].

Herhangi bir sıvı denge katılma sıcaklığının altında aşırı soğutulursa, kritik yarıçaptan daha büyük yarıçapa sahip çekirdekler oluşur. Bunun yanı sıra, yüksek aşırı soğutulmalarda sıvı ve katı durum arasındaki hacim serbest enerji farkının artması, kritik yarıçapı düşürür. Bu durumda homojen çekirdeklenmenin oluşması gözlenir. Çünkü

homojen çekirdeklenme, kritik yarıçaptan daha büyük yarıçaplı bir çekirdeğin oluşumuna neden olabilen aşırı soğumalarda gerçekleşir. Kısacası bir malzeme hızlı katılaştırma işlemine tabi tutulursa ilk olarak çekirdeklenme meydana gelir.

Çekirdeklenme sıklığının etkisinin ilk sistematik çalışması 1908 yılında Ingersoll ve Mendenhall tarafından katılaştırma üzerine yapılmıştır [13]. Ingersoll ve Mendenhall bu çalışmayla 50-100µm çaplı altın, platin ve rodyumun katılaşmasını incelemişlerdir [14]. Yine 1908’li yıllarda İngiltere’de hızlı katılaştırma üzerine eriyik döndürme sisteminin ilk mucitleri Strange ve Pim; çinko, kurşun ve diğer metal ve alaşımları ergitip şerit, folyo, levha üretim prosesini geliştirmişlerdir [15].

Modern anlamda ilk hızlı katılaştırma çalışmaları 1959 - 1960 yıllarında Duwez ve arkadaşları tarafından yapılmıştır [16]. Duwez ve arkadaşlarının 1959’da başlayan çalışmalarının amacı, Cu-Ag ikili alaşımında katı çözelti elde etmektir. Ancak, metalik camlar ile alakası olmayan bu çalışmada, sıvı halden hızlıca soğutulan %75 Au-%25 Si (atomik) alaşımı ilk defa amorf olarak elde edilmiştir [17, 18].

Duwez’in yüksek soğuma hızını başardığı ve amorf yapıyla alaşım elde ettiği bu çalışma “Duwez tabanca tekniği” (Duwez gun technique) olarak bilinmektedir. Bu metotta ısıtıcı olarak şok tüpü kullanılmış olup, eriyikler yaklaşık 1µm çapında damlacıklar haline getirilerek çok kısa süre (<1 sn) içerisinde püskürtülmüştür [19].

Duwez’ in tabanca tekniğini geliştirmesi ile beraber hızlı katılaştırma çalışmaları üzerine olan ilginin artması, değişik yeni tekniklerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. 1963 yılında Pietrokovsky, ergimiş bir metalin yüksek ısı iletkenliğe sahip iki yüzey arasında sıkıştırılarak soğutulması esasına dayanan “çekiç ve örs metodunu” (anvil and piston systems) geliştirdi [20]. Bu metodlar esas itibariyle birbirine benzer olmakla birlikte, eritilmiş metal (1 g’den az), ilkinde sabit örs ve hareketli piston, ikincisinde ise hareketli iki piston arasında sıkıştırılır. Ancak bu metod, elde edilen ürünün çok az olması ve sürekli üretim yapılamaması sebebiyle çok fazla rağbet görmemiştir [21]. Devam eden yıllarda araştırmacılar birçok yeni yöntemler üzerinde çalışmalar yapmışlar, ancak bunların birçoğu sınırlı üretim kapasitelerinden dolayı laboratuvar kullanımının dışına çıkamamışlardır.

1965’de Duwez tabanca tekniğini ilk olarak Predecki vd. [22] kullanmış ve yaptıkları çalışma “çarpma soğutması” (splat cooling) olarak adlandırılmıştır. 1969 yılında Harbur vd. [23], piston ve örs veya iki piston olarak adlandırılan sistemi geliştirmiştir. Bu sistemde

ise birbirine simetrik duran iki piston arasına bırakılan eriyik, pistonların çok hızlı bir şekilde sıkıştırılmasıyla soğutulmaktadır.

Pond [24], melt spinning metodu geliştirmeden önce 1958 yılında metalik filament (tel) üretim metodunu patentleştirmiştir. Ardından 1959 ve 1961 yıllarında bu patente ek aparat ve sürekli metalik filament üretim metodunun patentini almıştır [25, 26]. Bu patentler vasıtasıyla 1969 yılında metalik alaşımların hızlı katılaştırılmasında kullanılan melt spinning (eriyik döndürme) metodunu geliştirmiştir. Tüm bu yöntemlerde ortak nokta, eriyik haldeki sıvı metalin yüksek devir hızlarında dönen bir disk yüzeyinde katlaşmasıdır.

1969 yılında Pond vd. [27] alaşımların hızlı katılaştırılmasında kullanılan melt spinning metodunun geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapmışlar ve nozul çapı, püskürtme basıncı, disk hızı, disk çapı ve sıvı metal sıcaklığı parametrelerinin, şerit boyutlarına ve soğuma hızına etkilerini incelemiştir. Katılaştırılan şeritlerin soğuma hızlarının parametrelere bağlı olarak 10^5 - 10^8 K/s arasında değiştiğini belirtmişlerdir [28].

Melt spinning, sıvı metalin toz haline getirilmesine izin verilmeden şerit şeklinde üretilmesi işlemidir. Melt spinning yöntemi temelde bir hızlı katılaştırma işlemidir. Hızlı katılaştırma, bilimsel literatürde bir malzemenin yüksek sıcaklıktaki sıvı durumdan oda sıcaklığındaki veya ortam sıcaklığındaki katı hale dönüşüm boyunca hem aşırı ısıdaki hem de gizli ısıdaki termal enerjinin hızlı ve seri bir şekilde açığa çıkması olayıdır [6, 29, 30]. “Hızlı” kelimesinin tanımı ise, katlaşmanın başlaması ve bitmesi arasındaki çok kısa zaman aralığını (milisaniye) ve katlaşmanın tamamen gerçekleşmesindeki yüksek hızı ifade eder. Bu tür hızlı katılaştırma, kolay bir şekilde katlaşma esnasında, yüksek soğuma hızı ile elde edilebilir [31]. Bu işlemlerde, en az 10^4 K/s soğuma hızı olmakla üretim parametrelerine bağlı olarak soğuma hızı 10^4 - 10^8 K/s arasında değişmektedir [1, 30, 32-39]. Soğuma hızının artması için katlaşan şeridin en az bir boyutunun çok küçük (<150 μm) olması gerekir [38, 40-42]. Sıvı haldeki bir metalin hızlı katılaştırılması, sıvı metalin dar bir nozuldaki ısı iletkenliği yüksek bir plaka üzerine düşürülerek, tel, şerit, folyo, levha, sac, pul, toz vb. ürünlerin üretilmesi ile mümkündür [40-42].

Melt spinning tekniği gibi hızlı katılaştırmalar sırasında meydana gelen termal enerjinin hızla açığa çıkması, denge durumundan büyük sapmalar oluşturur. Bu durum şu şekilde avantajlar sağlar [6, 29, 30]:

- 1) Katı çözünürlüğün artması,
- 2) Bileşimsel (kompozisyonal) esnekliğin artması,

- 3) Alternatif faz seçim süreçleri boyunca eriyikten dengedışı (kararsız) veya yarı kararlı kristalli fazların oluşması,
- 4) İnce dispersoid ve sünek parçacıklar gibi istenilen ikincil fazların birleşmesi,
- 5) Segrege olmuş (birikmiş) fazların hem sayısında hem boyutunda bir azalma olması,
- 6) Normalde düzenli olan yapılardan düzensiz kristalli yapılar oluşması,
- 7) Mevcut fazların şekli ve konumu, tanelerin şekli ve boyutu gibi özelliklerin iyileşmesi, tane morfolojisinde değişim kombinasyonu veya bunların her birini içeren mikroyapısal etkilerin oluşması.

Hızlı katılaştırma prosesini, ısıtma, soğutma ve ürün haline getirme olmak üzere üç aşamaya ayırmak mümkündür [13].

- 1) Isıtma işlemi: Hızlı katılaştırmanın ilk aşaması malzemeyi eriyik haline getirme işlemidir. Bunun için indüksiyon, plazma, arkla eritme gibi birçok ısıtma (eritme) yöntemleri vardır.
- 2) Soğutma yöntemleri: Hızlı katılaştırmanın ikinci aşaması eriyik haline gelmiş malzemeyi soğutma işlemidir. Bunun için atomizör, melt spinning, plazma püskürtme gibi birçok yöntem uygulanmaktadır.
- 3) Birleştirme (Ürün haline getirme) işlemi: Son aşama ise elde edilen ürünlerin kullanılacak hale getirilerek teknolojiye uygulanmasıdır. Bunun için öğütme ile toz haline getirme, boyut küçültme, presleme ve sinterleme gibi yöntemler vardır. Bu yöntemler kullanılarak malzeme son ürün haline getirilmekte ve kullanıma sunulmaktadır.

Birçok hızlı katılaştırma yöntemi mevcuttur. Hızlı katılaştırma yöntemleri farklı araştırmacılar tarafından çeşitli şekillerde sınıflandırılmıştır. Elde edilen ürünlerin şekline göre, soğutma sırasındaki yöntem farklılıklarına göre, üretim tekniği ve üretim şartlarına göre çeşitli sınıflandırmalar yapılmıştır. Hızlı katılaştırma tekniklerini Jones [43], spray, soğutma ve yüzey teknikleri olarak üç kategoride sınıflandırmıştır. Savage ve Froes [44], damlacık oluşumuna göre atomizasyon ve diğer hızlı katılaştırma teknikleri olarak iki gruba ayırmıştır. Lavernia ve Srivatsan [30], hızlı katılaştırma tekniklerini son ürünün mikroyapısı ve soğuma hızı bakımından sınıflandırmıştır.

Bu çalışmada, AA6060 alüminyum alaşımı melt spinning yöntemi ile yüksek vakum altında toz ve şerit halinde üretilmiştir. Disk hızı, püskürtme basıncı, nozul-disk arası mesafe, sıvı metal sıcaklığı ve nozul genişliği gibi parametrelerin üretilen toz ve şeritlerin morfoloji, mikroyapı, boyut ve soğuma hızına etkileri incelenmiştir. Yapılan tüm deneysel

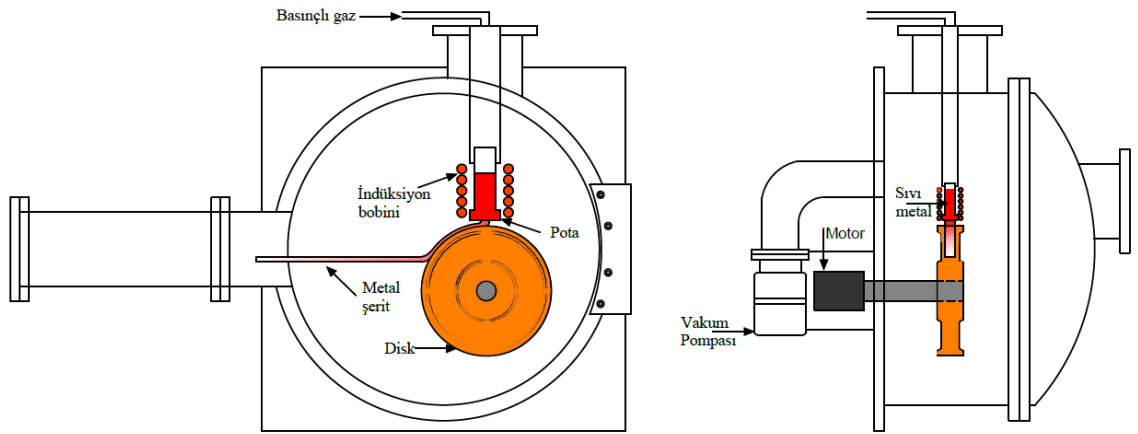
çalışmalar KTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde bulunan laboratuvarlarda gerçekleştirilmiştir.

1.2. Melt Spinning Tekniği

Melt spinning günümüzde uzun ve sürekli şeritler üretmek için yaygın şekilde kullanılan bir tekniktir. Aslında bu tekniğin gelişimi, hızlı katılaştırma teknolojisinin hızlanmaya başladığı 1970'lerden itibaren başlamıştır. Melt spinning tekniğinin ismi, ince şerit veya fiber üretmek için erimiş sıvı metalin ekstrüzyonunu içeren olaydan gelmiştir.[6]. Melt spinning sisteminin şematik görünümü Şekil 1'de gösterilmektedir.

Farklı hızlı katılaştırma tekniklerinden melt spinning tekniği diğer endüstriyel tekniklerle kıyaslandığında büyük avantajlara sahiptir [45]:

- Melt spinning tekniği en yüksek soğuma hızını elde edebilir.
- En iyi fiyat/performans oranına sahiptir.
- Hızlı katılaştırılmış ürünler için sürekli bir yöntemdir.
- Hızlı katılaştırılmış amorf veya mikrokristalli malzemeler üretilebilir.
- Gaz atomizasyonu veya spray teknikleri ile tek seferde toplu olarak ürün elde edilirken, melt spinning tekniği ile uzunluğu oldukça yüksek (7m'den daha fazla) ve endüstriyel boyutlarda sürekli (devamlı) ürün elde edilir.
- Diğer tekniklere göre uygulaması kolaydır [30].



Şekil 1. Melt spinning sisteminin şematik görünümü

1.3. Melt Spinning Yönteminin Çalışma Prensipleri

Melt spinning yüksek vakum altında gerçekleştirilen bir işlem olup, temelde indüksiyon ısıtılmalı pota ve soğutucu altlık olarak dönen diskten oluşmaktadır. Pota içindeki malzeme potanın etrafını çevreleyen indüksiyon bobini ile ısıtılıp eritilerek, üst taraftan bir soygaz basıncı ile potanın uç kısmındaki nozul vasıtasıyla potanın altında hızla dönmekte olan disk yüzeyine püskürtülür [46]. Yüksek sıcaklıktaki eriyik metal, hızlı bir şekilde katılaşıp dönen disk ile aniden temas etmesi sonucu şerit şeklinde oluşur.

Melt spinning yönteminin diğer hızlı katılaştırma yöntemlerinden üstünlükleri soğuma hızının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Diğer yöntemlerle $10^3 - 10^5$ K/s arası soğuma hızları elde edilirken, melt spinning tekniği ile $10^5 - 10^8$ K/s soğuma hızlarına ulaşılabilmektedir [8, 9, 11, 12, 39, 47-49].

Melt spinning sisteminde metal eritmede kullanılan potalar ve şerit oluşumunu ve soğumayı sağlayan diskler kritik öneme sahiptir. Pota seçimi, eritilecek malzemeye göre değişiklik gösterse de temelde dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır. Eriyiğin kimyasal kompozisyonu, sıcaklık dayanımı, termal şok direnci, düşük ısı iletkenliği, düşük porozite ve gaz geçirgenliği pota seçiminde önemli unsurlardır [6].

Tüm bu bileşenler göz önüne alındığında melt spinning işlemi için geçmişten günümüze kadar birçok farklı potalar denenmiştir.

Alumina potalar, termal şok direncine ve düşük ısı iletkenliğine sahiptir. Bunun yanında ısı dayanımının yüksek olması melt spinning işlemlerinde kullanılmasını sağlamıştır. Yoğun alümina ticari olarak bulunabilir ve işlenmesi kolaydır. Ayrıca $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklarda kullanılabilirler. En büyük dezavantajı ise içten yüksek oranda ısıtıldığında çatlama ve kırılmaya karşı duyarlı olmasıdır [6]. Urata vd. [50] ve Ibrahim vd. [51], yaptıkları melt spinning işlemlerinde pota malzemesi olarak alüminayı tercih etmişlerdir.

Kuvars potalar, $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ altındaki sıcaklıklarda kullanılırdırlar. Termal olarak şok direncine sahip, nispeten daha ucuzdur ve kolay bir şekilde bulunabilmektedir. Sıcaklık sınırlaması ve eriyik ile tepkimeye girmesi özellikle oksijen kirliliği oluşturması dezavantajlarıdır. Zhang ve Xu [52] ve Lanotte vd. [53], melt spinning yöntemiyle ürettikleri alaşım şeritlerini kuvars potada üretmişlerdir.

Melt spinning yönteminde tek bir pota ve nozul kullanılmasının yanında pota ve nozul farklı malzemelerden imal edilerek kullanılmaktadır. Örneğin, Choi vd. [54] ve Kang vd. [55] yaptıkları melt spinning işlemlerinde pota olarak kuvars kullanırken nozul olarak

alümina kullanmışlardır. Bunun sebebini, alüminanın daha yüksek sıcaklıklara dayanabilmesi ve iyi işlenebilirliğe sahip olması olarak belirtmişlerdir.

Grafit potalar, yüksek sıcaklık dayanımı, mekanik özellikleri, termal şok direnci, yüksek elektrik iletkenliği ve ısı iletkenliği, tercih edilmelerinde etken faktörlerdir. Bazı durumlarda 2000 °C sıcaklıklara kadar kullanılabilir. Yüksek sıcaklıklara dayanabilmesinin yanında düşük maliyetli ve uzun ömürlü olması avantajlarıdır. Tüm bu avantajlarının yanında eriyik ile tepkimeye girerek karbon kirliliği ve karbür oluşturması en büyük dezavantajlarıdır. Hou vd. [56] ve Uzun vd. [57] yaptıkları melt spinning işlemlerinde grafit pota kullanmışlardır. Bazı araştırmacılar grafit potalarda karbon kirliliğinin önlenmesi amacıyla grafit potayı kuvars malzeme ile kaplayarak kullanmışlar ve bu yolla karbon kirliliğini azaltmayı başarmışlardır [58]. Genellikle demir dışı malzemeler için, örneğin, çinko, alüminyum, bakır ve diğer metaller için grafit potalar tercih edilmektedir. Nadir toprak elementlerinin yüksek tepkime özelliklerinden dolayı ne grafit potalar ne de metal potalar uygun değildir. Bu tür malzemelerin eritilmesinde kuvars veya seramik malzemedeki potalar tercih edilebilir [6].

Hegzagonal bor nitrür, iyi kimyasal, elektrik ve termal özelliklere sahip olan beyaz renkli bir bileşiktir [59]. Hegzagonal bor nitrürün kristal yapısı, yumuşak olması, tabakalı olması ve kaygan olması özellikleri nedeniyle grafitte oldukça benzerdir. Bu nedenle beyaz grafit olarak da adlandırılmaktadır [60].

Hegzagonal bor nitrür potalar, düşük poroziteye sahiptir. Standart karbür kesici takımlar ile iyi işlenebilirler. Yüksek sıcaklık aralığında kullanılabilirler. Mükemmel termal yalıtım ile birlikte yüksek ısı ve termal şok direncine sahiptir [61]. Oksitlenmeye karşı oldukça dirençlidir. Zhou vd. [62] ve Hütten vd. [63] yaptıkları çalışmalarda hegzagonal bor nitrür potalar kullanmışlardır.

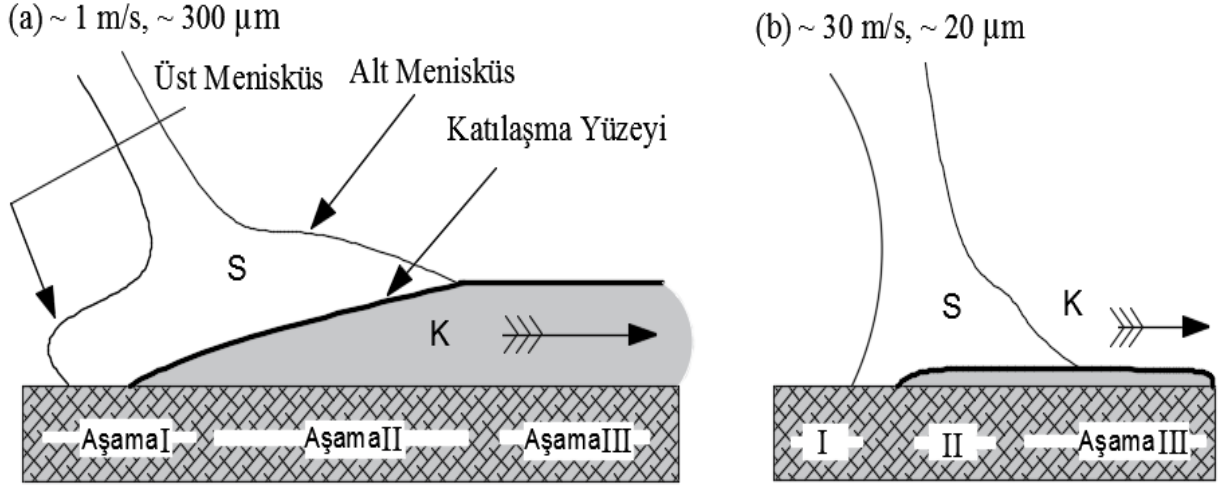
Yukarıda belirtilenler dışında eritilecek malzemeye göre pota seçimi çeşitlenmektedir. Pota olarak saf metal ve alaşımlar kullanıldığı gibi yüksek sıcaklık dayanımlarından dolayı MgO [64], Y₂O₃ ve CaO [6] gibi seramik potalar kullanılmaktadır. Bunun dışında bor nitrür kaplı alümina potaların kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur [65].

Melt spinning yönteminde diskler çeşitli malzemelerden yapılmakla beraber en çok kullanılanı bakırdır. Disk malzemesi seçimindeki temel amaç, şeritten mümkün oldukça hızlı bir şekilde ısının uzaklaştırılmasıdır. Bunun için seçilecek malzemenin ısı transfer katsayısının oldukça yüksek olması gerekmektedir. Bu açıdan yüksek ısı iletkenliğe sahip bakır diğer disk malzemelerine göre belirgin bir üstünlüğe sahiptir.

1.4. Şerit Oluşum Mekanizması

Melt spinning yönteminde gaz basıncı ile disk üzerine sevk edilen sıvı metal disk ile temas ettiği ilk anda disk üzerinde sıvı metal havuzu oluşur. Oluşan bu sıvı metal kütlesi diskin merkezkaç kuvveti etkisiyle incelerek şerit halinde uzar ve katılaşır. Sıvı metal kütlesinin konumu, diskin ve sıvı metalin sıcaklığı, diskin yüzey pürüzlülüğü, disk hızı, diskin termofiziksel özellikleri ve erimiş metal ile disk arasındaki temas açısı gibi birçok faktöre bağlıdır. Erimiş metal ile diskin mükemmel teması hiçbir zaman tam anlamıyla gerçekleşmemektedir [66].

Şekil 2’de verilmiş olan şerit oluşum mekanizması 1 m/s ve 30 m/s’ lik farklı disk hızları için modellenmiştir. Sıvı metal kütlesinin soğuk disk yüzeyine çarpmasıyla birlikte katı sınır tabakası oluşmakta ve şerit oluşumu bu anda başlamaktadır. Düşük disk dönme hızında (1 m/s) tipik şerit kalınlığı yaklaşık 300 µm civarındadır. Çarpma sırasındaki anlık soğuma hızı yüksektir ($\dot{T} \sim 10^5$ °C/s). Çünkü sıvı metal, çarpma ve temas alanı ile ilgili olarak ideal temasa sahiptir. Burada ısı transfer katsayısı (h') ile ifade edilir ve eriyiğin ilk katılaşmaya başladığı bölge aşama I olarak tanımlanır. Aşama I’ de uzaklaştırılan ısı $(C_P)^L dT + L$ ‘dir ve buradaki $(C_P)^L$ eriyiğin özgül ısısı, L ise gizli ısıdır. Şeridin disk ile teması kesildiği anda ısı direnci artar, çünkü ısı, disk ile şerit teması sonucunda disk aracılığıyla uzaklaşır. Dahası şerit ve disk arasındaki temas bölgesi katılaşma boyunca hacim değişikliğinden dolayı oldukça azalır. Tüm metal ve alaşımlar benzer davranışlar gösterir, yani, temas bölgesi küçülür. Bu bölge aşama II olarak adlandırılır ve şerit/disk arayüzündeki ısı transfer katsayısı (h'') ile ifade edilir ve bu katsayı (h')’ den daha küçüktür. Aşama II’ de uzaklaştırılan ısı $(C_P)^L dT + L$ ’dir. Ayrıca, (h'')’ nin küçük olmasından dolayı aşama II’ de uzaklaştırılan ısı miktarı aşama I’ dekinden daha azdır. Bu yüzden aşama II’ de oluşan mikroyapı daha iri tanelidir. Son safhada eriyik katılaşır ve bu aşama III olarak adlandırılır. Aşama III’de uzaklaştırılan ısı $(C_P)^L dT$ ’ dir ve ısı transfer katsayısı (h''')’ dir. Yüksek dönme hızında (30 m/s), şeritler daha ince (yaklaşık 20 µm) ve soğuma hızı daha yüksektir ($\dot{T} \sim 10^6$ °C/s). Ayrıca, yüksek dönme hızındaki ısı transfer katsayısı (h') (Şekil 2-b), düşük dönme hızındaki ısı transfer katsayısından (h') (Şekil 2-a) daha büyüktür. Yani, yüksek dönme hızlarında aşama II neredeyse hiç gerçekleşmemektedir ve bu durum şeritlerde daha ince mikroyapının oluşumuna neden olmaktadır [45].



Şekil 2. Şerit oluşturma süreci (a) Düşük disk hızı (1 m/s) ve kalın şerit (300 μ m), (b) yüksek disk hızı (30 m/s) ve ince şerit (20 μ m) [45].

Tablo 1. Şerit oluşturma sürecinin farklı aşamalarında ısı transfer katsayıları ve çıkarılan ısı

Aşama	I	II	III
Isı Transfer Katsayısı	h'	h''	h''
Çıkarılan Isı	$(C_p)^L dT + L$	$(C_p)^L dT + L$	$(C_p)^L dT$

Napolitano ve Meco [67], yapmış oldukları melt spinning çalışmasında eriyik havuzunun disk hızına göre değişimini yüksek hızlı optik kamera ile görüntülemişler ve eriyik havuzunun davranışını, şerit geometrisini, şerit morfolojisini ve şerit yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar neticesinde şerit kalınlığının disk hızı ile değiştiğini belirtmişlerdir. Özellikle eriyik havuzu uzunluğunun artan disk hızı ile azaldığını ifade etmişlerdir.

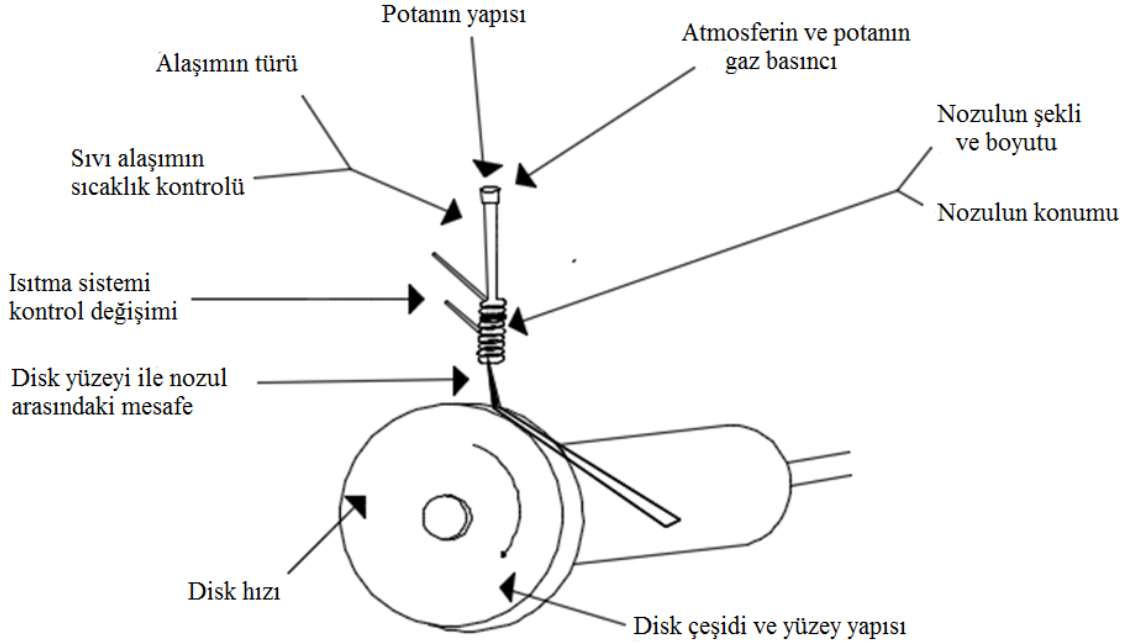
1.5. Melt Spinning İşlem Parametreleri

Literatürde, melt spinning işleminde şeritlerin boyut ve özelliklerine etki eden pek çok parametrenin olduğu belirtilmiştir. Bu parametreler

- 1) Disk hızı,
- 2) Püskürme basıncı,

- 3) Sıvı metal sıcaklığı,
- 4) Alaşım bileşimi (element etkisi),
- 5) Nozul şekli ve boyutu,
- 6) Nozul – disk arası mesafe,
- 7) Kullanılan püskürtme gaz türü,
- 8) Ortam basıncı,
- 9) Potanın disk ile yaptığı açı,
- 10) Nozul uç açısı,
- 11) Disk çeşidi, büyüklüğü ve yüzey yapısı, şeklinde sıralanabilir.

Melt spinning işleminde temel parametreler Şekil 3’ de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. Melt spinning prosesinde etkili olan bazı parametrelerin şematik gösterimi [68].

1.5.1. Disk Hızı

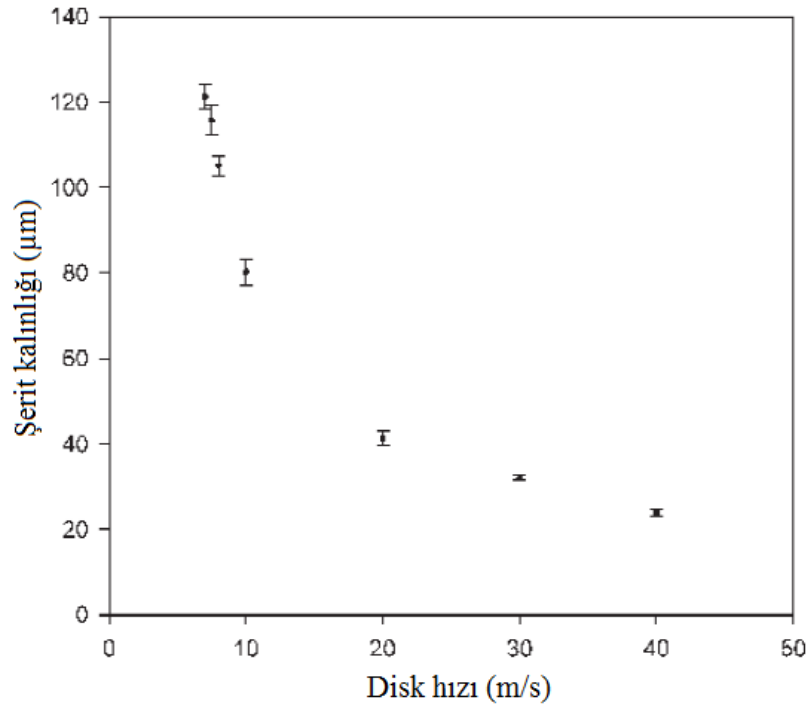
Disk hızı melt spinning işleminde en önemli parametrelerden birisidir. Disk hızının değişmesi üretilen şeritlerin boyutlarına ve soğuma hızlarına etki etmektedir. Disk hızının etkisi, literatürde melt spinning parametreleri ile ilgili olarak en çok çalışılan parametredir [67, 69-78]. Aynı zamanda, disk hızının değiştirilmesinin kolay olması ve melt spinning

işlemine etkisinin net olarak görülebilmesi, bu parametrenin üzerinde daha çok çalışılmasına sebep olmaktadır.

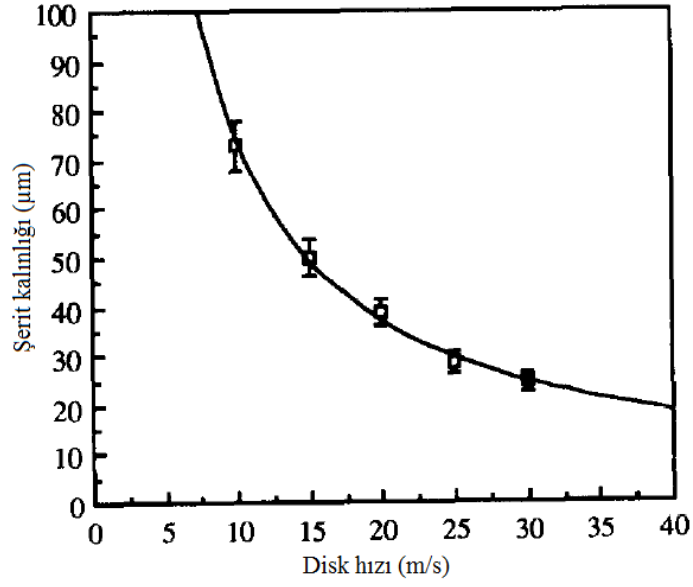
Genel olarak disk hızının artması, soğuma hızını da arttırmakta ve şerit kalınlığını azaltmaktadır [38]. Ayrıca disk hızının artması amorf faz oluşumu şansını da arttırmaktadır. Nitekim artan disk hızıyla daha ince ve daha homojen mikroyapı elde edilmektedir.

Şerit kalınlığındaki değişim dışında disk hızının şerit genişliği ve uzunluğuna etkisi konusunda bazı çalışmalar bulunmaktadır. Akdeniz ve Wood [77], Chaklanobis ve Agrawal [79] disk hızı ile şerit genişliğinin değişimini incelemişler ve disk hızının şerit genişliğine ve uzunluğuna bir etkisi olmadığını belirtmişlerdir.

Şekil 4' de görüldüğü gibi Napolitano ve Meco [67] melt spinning ile yapmış oldukları çalışmada artan disk hızı ile şerit kalınlığının azaldığını savunmuşlardır. Benzer durumu Akdeniz ve Wood [77] yapmış oldukları şerit geometrisiyle ilgili çalışmada disk hızının artmasıyla şerit kalınlığının azaldığını belirtmişlerdir (Şekil 5).



Şekil 4. Napolitano ve Meco' nun disk hızı - şerit kalınlığı grafiği [67].



Şekil 5. Akdeniz ve Wood' un disk hızı - şerit kalınlığı grafiği[77].

1.5.2. Püskürtme Basıncı

Eriyiğin potadan çıkartılması için her zaman yer çekimi yeterli olmayabilir. Eriyiğin potadan diske çarptırılması için bir gaz basıncı gereklidir. Asıl amaç eriyiğe basınç uygulayarak potadan çıkartmaktır. Püskürtme potanın üst kısmından eriyiğe doğru olmalıdır. Eriyiği püskürtmek için genelde inert gaz kullanılmasına rağmen herhangi bir uyumlu gaz da kullanılabilir.

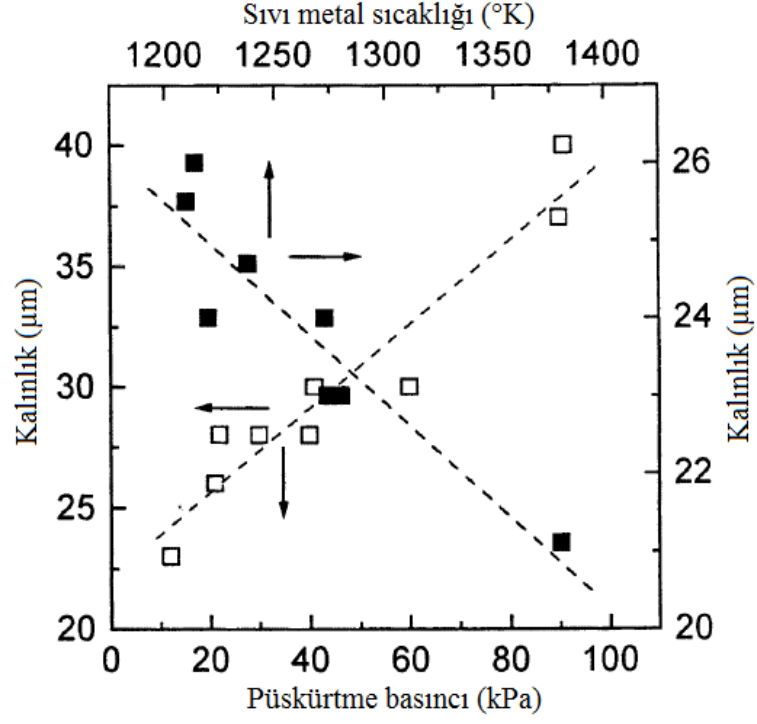
Yüksek püskürtme basıncının kullanılması erimiş metalin daha hızlı ilerlemesine neden olabilir ve bu da eriyik ile dönen disk arasındaki termal teması iyileştirebilir [6].

Püskürtme basıncının şerit kalınlığına etkisi çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir [79-84]. Artan püskürtme basıncı ile şerit kalınlığının arttığı gözlemlenmiştir.

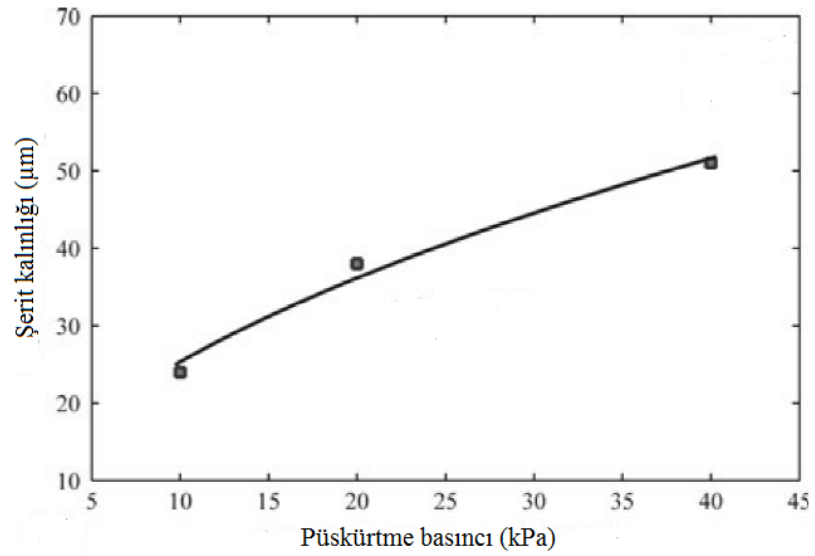
Taha vd. [85] püskürtme basıncı artarken şerit genişliği ve şerit uzunluğunun arttığını belirtmişlerdir. Chaklanobis ve Agrawal [79], Tkatch vd. [80] ve Sohrabi vd. [81] püskürtme basıncının şerit geometrisine, özellikle şerit kalınlığına etkisini incelemişlerdir.

Şekil 6' da püskürtme basıncının ve sıvı metal sıcaklığının şerit kalınlığına etkisi gösterilen grafikte, Tkatch vd. [80], melt spinning parametrelerinin soğuma hızı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Püskürtme basıncının artmasıyla şerit kalınlığının arttığını ve sıvı metal sıcaklığının artmasıyla şerit kalınlığının azaldığını belirtmişlerdir.

Sohrabi vd.'nin [81] yapmış oldukları çalışmada da püskürtme basıncının artmasıyla şerit kalınlığının arttığı görülmüştür (Şekil 7).



Şekil 6. Tkatch vd.'nin püskürtme basıncı - kalınlık ve sıvı metal sıcaklığı - kalınlık grafiği [80].



Şekil 7. Sohrabi vd.'nin püskürtme basıncı - şerit kalınlığı grafiği [81].

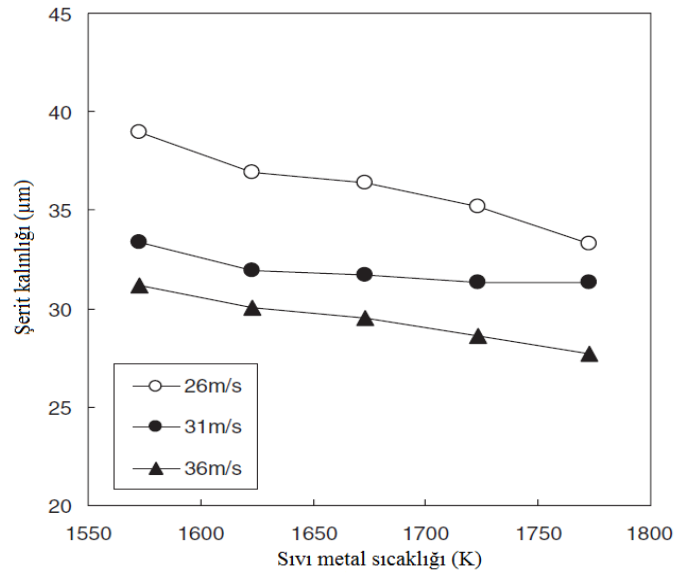
1.5.3. Sıvı Metal Sıcaklığı

Saf metalin ergime sıcaklığının, alaşımın ise likidüs sıcaklığının üzerinde ısıtılmasına aşırı ısıtma denir. Aşırı ısıtma miktarının artması vizkoziteyi ve yüzey gerilimini düşürür. Yüzey geriliminin düşmesi sıvı metal ile disk arasındaki ıslatma açısını azaltır, daha ince bir sıvı film tabakası oluşur ve şerit oluşumu kolaylaşır. Bu durum şerit kalınlığının azalmasına yol açar. Ancak, çok yüksek aşırı ısıtma değerlerinde soğuma yavaşlayacağından, şerit kalınlığında bir artış söz konusu olabilir.

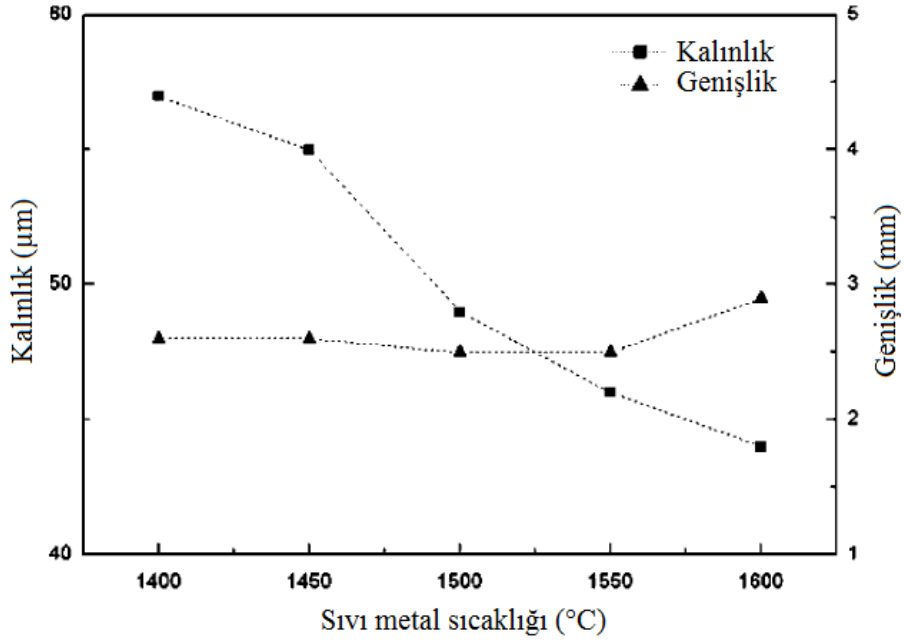
Sıvı metal aşırı ısıtma miktarının melt spinning işleminde şerit özelliklerini nasıl etkilediği konusunda değişik çalışmalar mevcuttur [78, 80, 86-91]. Yapılan çalışmalarda artan aşırı ısıtma miktarı ile şerit kalınlığının azaldığı, şerit uzunluğunun ise arttığı belirtilmiştir.

Nakagawa vd. [88] hızlı katılaştırmada sıvı metal sıcaklığının etkilerini incelemiştir. Şekil 8’ den de görüldüğü gibi farklı disk hızlarında artan sıvı metal sıcaklığı ile şerit kalınlığının azaldığını belirtmişlerdir.

Kim ve Nam [86] Ni-Ti bazlı şekil bellekli alaşımında melt spinning parametrelerinin etkilerini incelemiştir. Yapmış oldukları çalışmada, artan sıvı metal sıcaklığı ile şerit kalınlığı azalırken şerit genişliğinde değişim olmamıştır. Sıvı metal sıcaklığının şerit kalınlığına ve şerit genişliğine olan etkileri Şekil 9’ da verilmiştir.



Şekil 8. Nakagawa vd.'nin şerit kalınlığı ve sıvı metal sıcaklığına göre değişim gösteren eğriler [88].



Şekil 9. Kim ve Nam' ın sıvı metal sıcaklığı ile şerit kalınlığı ve genişliği grafiği [86].

1.5.4. Alaşım Kompozisyonu (Element Etkisi)

Melt spinning işlemini doğrudan etkileyen parametrelerden biridir. Her alaşım için melt spinning işlemi farklılık göstermektedir. Alaşımı oluşturan elementlerin atomik olarak veya ağırlık olarak değişmesi şerit geometrisini ve soğuma hızını etkilemektedir. Her türlü element ve alaşıma göre şerit geometrisi çeşitlilik gösterebilmektedir. Bunun sebebi, oluşturulan alaşımın yoğunluk, viskozite, akışkanlık ve yüzey gerilimi farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden alaşım elementi içeriği değiştirilerek daha iyi özelliklerde daha ince şeritler ve daha iyi soğuma hızı elde edilebilir.

Farklı alüminyum alaşımlarında elementlerin etkisi Karaköse ve Keskin [10] ve Liu vd. [92] tarafından incelenmiştir. Karaköse ve Keskin [10] alüminyuma Fe, Ni ve Cu ekleyerek bu alaşımları hızlı katılaştırmışlardır. Oluşturdukları yüzde ağırlıkça Al-3Fe, Al-3Ni ve Al-3Cu alaşımlarını melt spinning tekniği ile üreterek şerit kalınlıkları ve soğuma hızlarını incelemişlerdir. Şerit kalınlıkları olarak en büyük değere sahip olan alaşım Al-3Ni alaşımı iken en düşük değere sahip olan alaşım Al-3Fe alaşımıdır. Liu vd. [92] ise TiAl alaşımına yitrium (Y) elementinin etkisini incelemişlerdir. Yüzde atomik olarak Ti-46Al-2Cr-2Nb ve Ti-46Al-2Cr-2Nb-1Y alaşımlarını hızlı katılaştırıp şerit kalınlığındaki

değişimi araştırmışlardır. Bu alaşımlarda yitrium içeren alaşımın şerit kalınlığı diğerine göre daha ince olduğu tespit edilmiştir. Chen vd. [93], NdFeB alaşımına at.%1Y elementi ekleyerek daha ince bir yapı oluşturduğunu belirtmişlerdir.

Cheng vd. [94] $Fe_{100-x}Ga_x$ alaşımında $x=17, 21, 25, 30$ olarak 4 farklı alaşım ilavesini incelemişler ve Ga elementi ile şerit kalınlığında büyük değişiklik elde edilememiştir. Ausanio vd. [95] $Nd_{90-x}Fe_xAl_{10}$ manyetik alaşımı için $x=35, 40, 50$ olarak 3 farklı alaşımı melt spinning tekniği ile üretmişler ve Nd içeriğinin şerit kalınlığını etkilediğini ifade etmişlerdir. Mendoza vd. [96] $Pr_xFe_{94-x}B_6$ alaşımının manyetik özellikleri için $x=6, 8, 9, 10$ olarak 4 farklı alaşım çalışmışlar ve Pr elementinin şerit kalınlığında nispi değişiklikler gösterdiğini belirtmişlerdir.

1.5.5. Nozul Şekli ve Boyutu

Literatürde yapılan melt spinning çalışmalarında değişik nozul geometrileri kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda en çok tercih edilen nozul geometrileri dairesel ve dikdörtgen şekilli olanlardır. Dairesel kesitli nozullarla yapılan melt spinning işleminde nispeten genişliği düşük, kalın şeritler elde edilirken, dikdörtgen kesitli nozullarda ise daha ince ve geniş şeritler elde edilmektedir.

Jassim ve Hammood [48, 90] ve Cheng vd.[94] yaptıkları melt spinning işlemlerinde farklı nozul çapları kullanmışlar ve artan nozul çapları ile şerit kalınlıklarının arttığını belirtmişlerdir.

1.5.6. Nozul – Disk Arası Mesafe

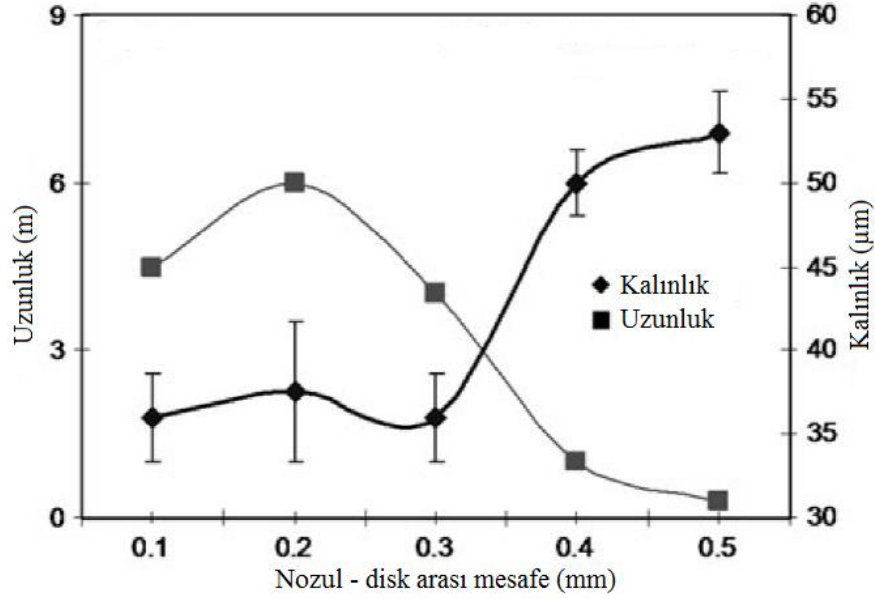
Nozul – disk mesafesinin etkisi, eriyik nozuldan çıktıktan sonra oluşan eriyik havuzunun şeklini değiştirmektedir. Eriyik havuzunu etkileyen bu parametre şerit kalınlığını da etkilemektedir [66, 80, 82, 86, 87, 97-100].

Li vd. [99] şerit kalınlığının, nozul – disk aralığı ile kontrol edilebilmesi üzerine modelleme yapmıştır. Yapılan çalışmada hem teorik olarak şerit kalınlığı hesaplaması yapılmış hem de deneysel olarak nozul – disk aralığının şerit kalınlığına etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan nozul – disk aralığının azalmasıyla şerit kalınlığının

azaldığı, nozul – disk aralığını kontrol ederek şerit kalınlığının değiştirilebileceği ortaya konmuştur.

Pagnola vd. [100] melt spinning işleminde nozul çapı/şerit genişliği ilişkisinin etkisini ve şerit kalınlığının analizini çalışmışlardır. Farklı disk hızlarında 3 farklı nozul-disk aralığı denenmiştir. Düşük disk hızlarında artan nozul - disk aralığı ile kalınlık artmıştır. Disk hızı arttıkça nozul – disk aralığının etkisi de azalmış ve şerit kalınlıkları birbirlerine yakın değerlerde bulunmuştur.

Srinivas vd. [82] FeSiBNbCu alaşımında planar flow melt spinning parametrelerinin etkilerini incelemişler. Şekil 10’ da verilen grafikte, nozul – disk arası mesafe ile şerit kalınlığı 0,3 mm’ ye kadar sabit daha sonra artan nozul – disk mesafesi ile şerit kalınlığının arttığı bulunmuştur. Nozul – disk mesafesinin şerit uzunluğuna etkisi sigmoidal davranış göstererek 0,2 mm’ ye kadar artmış ve daha sonra 0,2 mm’ den 0,5 mm’ ye kadar azalmıştır.



Şekil 10. Srinivas vd.'nin nozul - disk arası mesafe - şerit kalınlığı ve uzunluğu grafiği [82].

1.5.7. Kullanılan İnerj Gaz Çeşitleri

Melt spinning işleminde erimiş haldeki metal dönmekte olan disk üzerine kendi ağırlığıyla değil genellikle basınçlı bir gaz yardımıyla gönderilir. Kullanılan gazlar

çoğunlukla yüksek saflıkta argon ve helyum gazlarıdır. Argonun ve helyumun birbirlerine göre farklı özellikleri bulunmaktadır. Argonun helyuma göre daha ucuz olması melt spinning işlemleri sırasında argon gazının daha yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Helyum gazının ısı iletkenliğinin argona göre yüksek olması şeritlerin soğuma hızını artırıcı yönde etki yapmaktadır [76, 101].

1.5.8. Melt Spinning Atmosferi

Genelde melt spinning sisteminde hava, vakum, argon ve helyum ortamı olmak üzere dört farklı ortam bulunmaktadır. Hava ortamında yapılan melt spinning işlemlerinin en büyük problem oksitlenmedir. Bu sorunu gidermek için melt spinning işlemi genellikle vakum veya bir inert gaz ortamında gerçekleştirilir [102].

Todd vd. [103] ortam basıncının üretilen şeritlerin yüzey kalitesine ve manyetik özellikleri üzerine etkilerini incelemiştir. Yapılan çalışmada hava, argon ve helyum olmak üzere üç farklı ortam atmosferi denenmiştir. Helyum atmosferinde üretilen şeritlerin manyetik özelliklerinin diğer ortamlarda üretilenlere göre daha üstün olduğu belirtilmiştir.

Kramer vd. [76] argon, helyum ve vakum ortamlarında şeritler üreten soğuma hızının ortam basıncından bağımsız olduklarını belirtmişlerdir. Argon ve helyum gazı ortamında üretilen şeritlerin soğuma hızlarının vakum ortamında üretilenlere göre daha yüksek olduğunu ortaya koymuşlardır.

Yang vd. [104] argon atmosferinde ve 0,0001, 0,01, 0,1 ve 0,2 atm basınçlar altında melt spinning işlemini gerçekleştirmişler ve şerit kalınlığının ortam atmosfer basıncından bağımsız olduğunu belirtmişlerdir.

1.5.9. Nozulun Disk Yüzeyi ile Yaptığı Aç

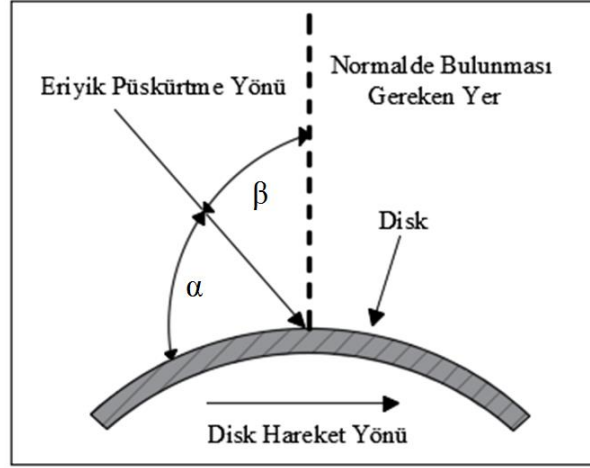
Melt spinning işlemlerinin bir kısmında pota ile disk arasında 90°' lik bir açı mevcutken, bazılarında ise pota disk yüzeyine eğik konumda konumlandırılarak işlem gerçekleştirilir. Fiedler vd. [105] şerit geometrisi üzerindeki proses değişkenleri arasında püskürtme açısından da bahsetmiştir. Liebermann [106] şerit geometrisini etkileyen faktörleri incelediği çalışmasında eriyik püskürtme açısının şerit kalınlığını ve genişliğini

etkilediğini belirtmiş ve kalınlık ve genişlik hesaplamalarında β eriyik çarptırma açısını da kullanmıştır.

Anestiev vd. [107] sıvı metal havuzu uzunluğu ile ilgili hesaplamalarında sıvı metal debisi, disk hızı, nozul çapı gibi parametrelerin yanı sıra eriyiğin püskürtme açısını da parametreler arasına dâhil etmiştir.

Pavuna [108] üretilen şeritlerin soğuma hızı için melt spinning parametrelerinin optimum koşullarını belirlediği çalışmasında sıvı metal püskürtme açısının optimum değerinin $75^\circ < \alpha < 90^\circ$ arasında olduğunu ifade etmiştir.

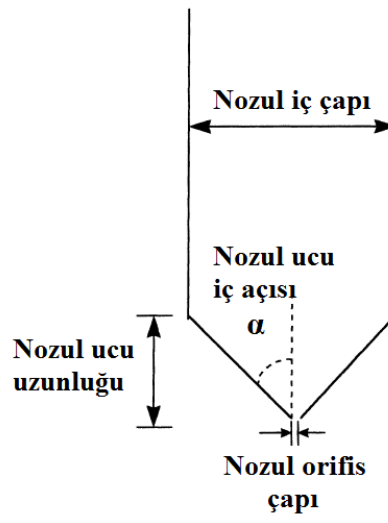
Kukulka vd. [109] yaptıkları tahmini şerit kalınlığı çalışmalarında Şekil 11'deki β açısının 15° ye kadar artmasıyla şerit kalınlığının azaldığını hesaplamışlardır.



Şekil 11. Eriyiğin püskürtme açısının şematik gösterimi [45].

1.5.10. Nozul Ucunun Açısı

Melt spinning çalışmalarında kullanılan nozulların dip kısmı sıvı metal akışını kolaylaştırması açısından konik olarak tasarlanmaktadır. Böylece sıvı metal daralan bir kesitten gönderildiğinden dolayı hem işlem sonunda nozulun dip kısmında kalıntı metal sorunu ortadan kalkar hem de düzenli bir sıvı metal akışı sağlanmış olur. Panda vd. [110] melt spinning işleminin sorunsuz bir şekilde gerçekleşmesi için düzenli bir sıvı metal akışının gerekli olduğunu belirtmişlerdir. Yapmış oldukları sıvı metal akış hesaplamalarında Şekil 12'de şematik olarak gösterilen nozul tasarımının olumlu neticeler verdiğini ifade etmişlerdir.



Şekil 12. Melt spinning prosesinde kullanılan nozul geometrisi [110].

1.5.11. Disk Malzemesi, Disk Çapı ve Yüzey Durumu

Melt spinning işlemlerinde disk malzemesi olarak yüksek ısı transfer katsayısına sahip olan malzemeler kullanılmaktadır. Yüksek ısıl iletkenliğe sahip malzemelerden üretilen diskler sıvı metalin ısını hızla uzaklaştırmakta ve hızlı katılaştırmaya imkân vermektedir. Bu açıdan, melt spinning işlemlerinde disk malzemesi olarak genellikle yüksek ısıl iletkenliğe sahip saf bakır (ısıl iletim katsayısı 398 W/m.K) kullanılmaktadır. Bakırın dışında pirinç (109 W/m.K), bronz (110 W/m.K), paslanmaz çelik (16 W/m.K), molibden (138 W/m.K) gibi diskler de kullanılmaktadır.

Kullanılan diskin çap ölçüsü etkili bir parametre olup genellikle 250 - 350 mm arasında değişmektedir. Aynı devir sayılarına sahip iki diskten çapı büyük olanı daha büyük merkezkaç kuvveti meydana getireceğinden, daha ince kalınlıkta şerit üretilmesini sağlar [111].

Melt spinning prosesinde diske verilen enerji, sıvı metali disk kenarından yüksek hızla savurmak için harcanır. Burada harcanan güç:

$$W = \frac{1}{2} \rho Q v^2 \quad (1)$$

eşitliğinden hesaplanır. Bu eşitlikte yer alan W harcanan gücü, ρ sıvı metal yoğunluğunu, v disk çevresel hızını ve Q sıvı metal akış debisini göstermektedir.

Disk kenarında oluşacak en yüksek çevresel hız aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir:

$$v=wR \quad (2)$$

Burada; v : diskin çevresel hızı, w : diskin açısal hızı, R : disk yarıçapıdır.

Yukarıda verilen (1) ve (2) nolu eşitliklerden melt spinning diski yarıçapı aşağıdaki şekilde elde edilir.

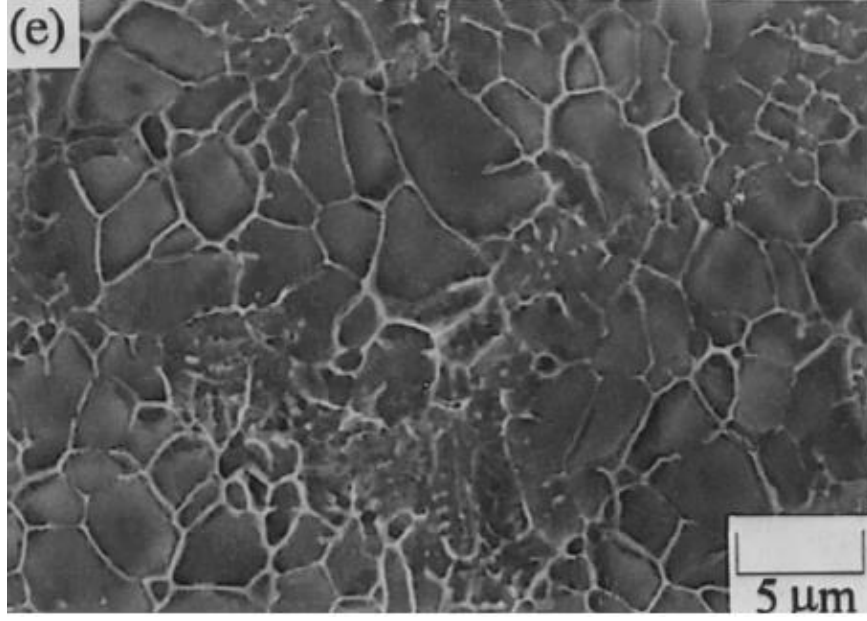
$$R_{\max} = \frac{1}{w} \sqrt{\frac{2W}{\rho Q}} \quad (3)$$

Disk yüzey pürüzlülüğü ve temizliği elde edilen şeritlerin özelliklerini etkilemektedir. Pürüzsüz ve temiz bir disk yüzeyi ile sıvı metal teması daha iyi olacağından elde edilecek şeritlerin soğuma hızı artacak, şerit kalınlığı azalacaktır.

1.6. Melt Spinning Yönteminde Soğuma Hızı

Melt spinning işleminde soğuma hızını etkileyen birçok değişken mevcuttur. Mümkün olan maksimum soğuma hızını başarmak için gerekli parametreleri çok iyi ayarlamak gerekmektedir. Ayrıca soğuma hızının büyüklüğü ve değişkenliği elde edilen mikroyapıların açıklanmasına yardım etmektedir [1, 6]. Bunların dışında her alaşımın içerdiği elemente göre akışkanlık, yüzey gerilimi gibi etkenlerin değişmesiyle birlikte soğuma hızı için gereken katsayıların değişmesine neden olmaktadır.

Lee vd. [112] planar flow casting melt spinningde Al - Cu alaşımını çalışmışlar ve katılma zamanını hesaplamışlar ve 2,28 ve 8,40 ms⁻¹ aralığında olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 13).

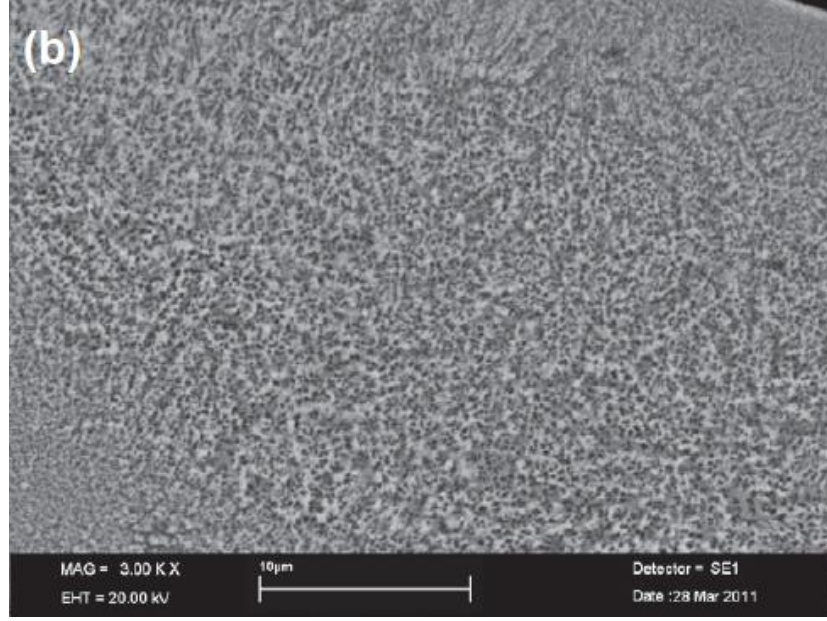


Şekil 13. Lee vd.' nin Al-Cu alaşımı mikroyapısı [112].

Karaköse ve Keskin[10] hızlı katılaştırılmış Al esaslı alaşımların mekanik özelliklerini incelemiştir. Şeritlerin soğuma hızlarını (4) nolu eşitlik ile hesaplayarak 10^6 K/s soğuma hızlarına ulaşmışlardır (Şekil 14).

$$R = \frac{h(T_1 - T_0)}{C_p \rho t} \quad (4)$$

Bu eşitlikte; R:Soğuma hızı, h:Erimiş metal ile disk arasındaki ısı transfer katsayısı, T_1 :Erimiş metalin sıcaklığı, T_0 :Diskin sıcaklığı, C_p :Özgül ısı, ρ :Yoğunluk, t:Şerit kalınlığıdır.



Şekil 14. Karaköse ve Keskin'in Al-%3Fe alaşımı için elde ettikleri mikroyapı [10].

Verma vd. [113] ve Samuel vd. [114] 6000 serisi alüminyum alaşımlarını çalışırken soğuma hızı olarak (5) nolu eşitliği kullanarak soğuma hızlarını hesaplamışlardır.

$$\vartheta = 3,57 \times 10^4 DAS^{-2,56} \quad (5)$$

Bu eşitlikte; ϑ : Soğuma hızı, DAS: ikincil dendrit kol aralığı veya ortalama tane boyutudur.

Xu vd. [115] Al - Si alaşımı ile yapmış oldukları melt spinning çalışmasında üretilen şeritlerin katılma zamanının hesaplanmasında aşağıdaki (6) nolu bağıntıyı kullanmışlardır ve 1.11×10^6 °C/s' lik soğuma hızı elde ettiklerini ifade etmişlerdir.

$$t_s = \left\{ \frac{\sqrt{\pi \xi \rho [(1-w)L_1 + wL_2 + c_1(T_{10} - T_e)]}}{2b_2(T_i - T_{20})} \right\} \quad (6)$$

Eşitlik 2’de verilen denklemde t_s : katılaştırma zamanı, ξ : şerit kalınlığı, ρ : yoğunluk, w : silisyum içeriği, L_1 : alüminyum gizli ısısı, L_2 : silisyum gizli ısısı, c : özgül ısı kapasitesi, T_{10} : şeridin sıcaklığı, T_{20} : soğuk diskin sıcaklığı, T_e : ötektik sıcaklığı, T_i : şerit ve disk ara yüzeyinin sıcaklığı ve b_2 : ısı depolama katsayısı olarak verilmektedir. Katılaştırma zamanı ile de soğuma hızı hesaplanabilmektedir. Dong vd. [9], Chen vd. [47] ve Rajabi vd. [116, 117] Al - Si alaşımı şeritlerin soğuma hızlarının belirlenmesinde (6) nolu eşitliği kullanmışlardır.

1.7. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Yapılan literatür incelemesinde, melt spinning işleminde ağırlıklı olarak bakır veya bakır alaşımlı diskler ve genellikle grafit pota kullanılmaktadır. Bu işlemlerde çoğunlukla soğutmasız diskler kullanılmakta ancak bazı araştırmacılar tarafından su soğutmalı disklerin kullanıldığı belirtilmektedir. Kullanılan diskin su ile soğutulması üretilen şeritlerin soğuma hızını doğrudan etkileyen önemli bir parametredir. Soğutulmuş diskle elde edilen şeritlerin soğuma hızı soğutulmayan diskle üretilenlere göre daha yüksektir.

Ayrıca nikel ve bakır esaslı şekil bellekli alaşımlardan neodyum-demir-bor esaslı kalıcı manyetik alaşımlara pek çok alaşımın melt spinning yöntemiyle çalışıldığı anlaşılmıştır. Bu alaşımların yanında, alüminyum esaslı alaşımlar da melt spinning işleminde kullanılan alaşımlar olmuştur. Alüminyum esaslı alaşımlarda katı çözünürlük sınırının yüksek olması hızlı katılaştırma için bu alaşımların tercih edilmesini sağlamıştır. Kullanılan alüminyum esaslı alaşımlar arasında Al-Zn, Al-Si, Al-Cu, Al-Fe Al-Si, Al-Zn, Al-Cu-Fe ve Al-Mg alaşım sistemleri bulunmaktadır.

Çoğu araştırmacı, melt spinning işlem parametrelerinde çoğu zaman disk hızının etkisini incelemişlerdir. Disk hızının seçilmesindeki etkili faktörler şerit üzerindeki etkisinin diğer tüm parametrelerden daha fazla olması ve disk hızını değiştirmenin diğer parametrelere göre daha kolay olması sayılabilir. Disk hızının yanında, alaşım elementi, püskürtme basıncı, aşırı ısıtma miktarı ve nozul - disk arası mesafe en çok araştırılan melt spinning parametreleri arasındadır. Tüm bu parametreler değiştirilerek şerit kalınlığı, morfoloji, mikroyapı ve soğuma hızı değiştirilebilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, melt spinning yöntemiyle hızlı katılaştırılmış AA6060 alüminyum alaşımı toz ve şeritler üretmek, üretim parametrelerinin elde edilen toz ve

şeritlerin boyutlarına, morfolojilerine ve mikroyapılarına etkilerini araştırmak ve optimum üretim parametrelerini ortaya koymaktır.

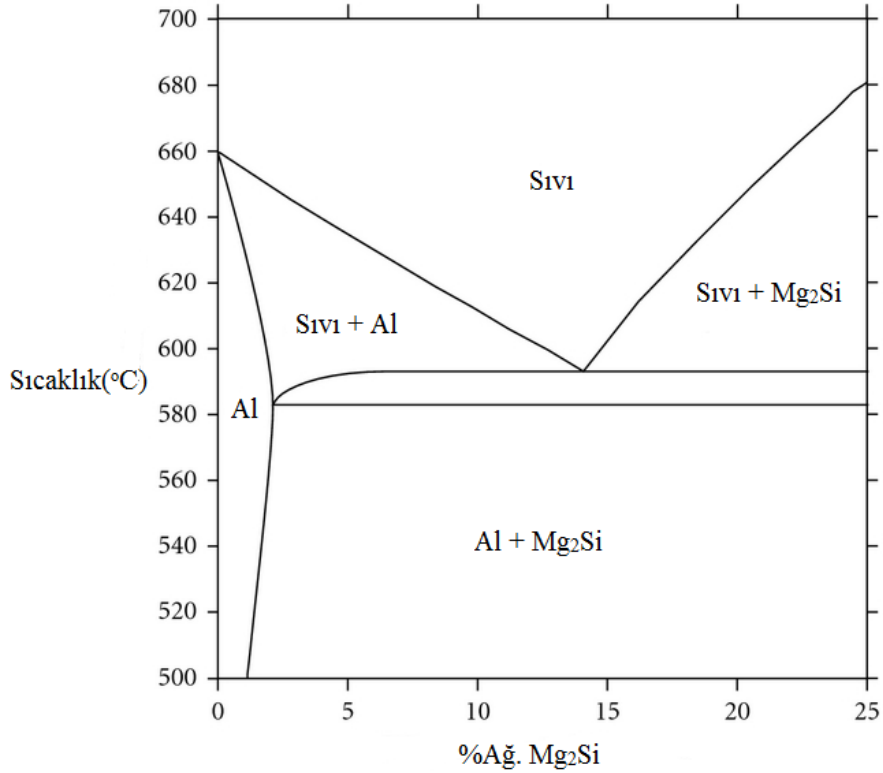
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Kullanılan Alaşım

Bu çalışmada, melt spinning parametrelerinin şerit kalınlığına ve soğuma hızına etkisini incelemek amacıyla, AA6060 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Kullanılan alaşımın kimyasal bileşimi Tablo 2’de ve ilgili alaşıma ait faz diyagramı Şekil 15’ de verilmiştir.

Tablo 2. AA6060 alüminyum alaşımı kimyasal bileşimi (ASTM B221 – 14)

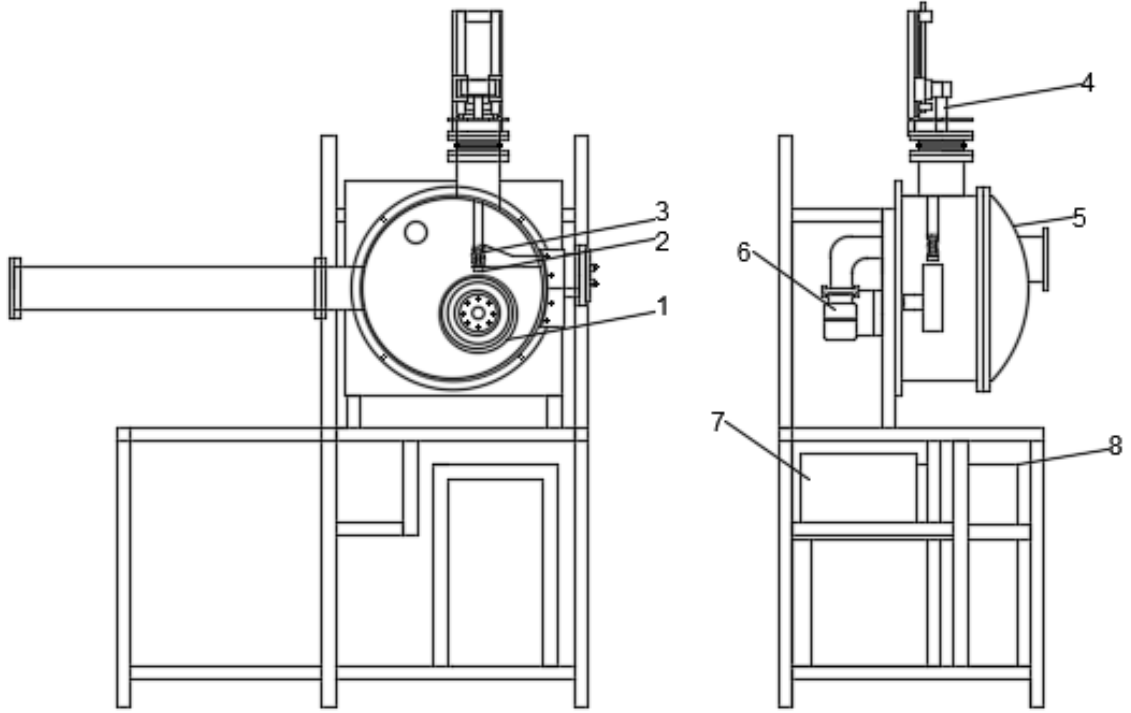
Elementler (%ağ.)	Mg	Si	Fe	Zn	Cu	Mn	Ti	Cr	Al
	0,35-0,60	0,30-0,60	0,1-0,3	0,15	0,10	0,10	0,10	0,05	Denge



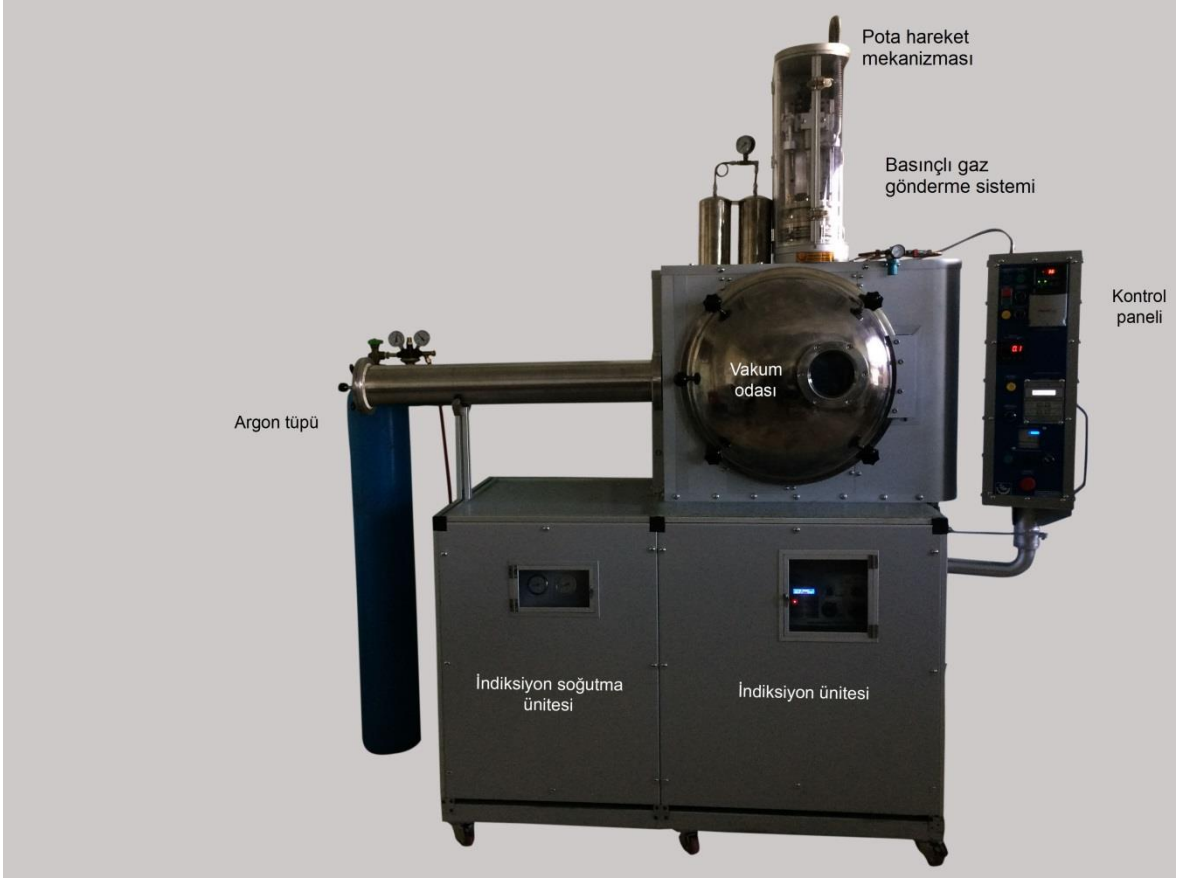
Şekil 15. AA6060 alüminyum alaşımı faz diyagramı

2.2. Kullanılan Melt Spinning Sistemi Ünitesi

Bu çalışma kaSMSamında yapılan deneysel çalışmalar Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü' nde bulunan ve Şekil 16' da şematik resmi verilen melt spinning cihazı ile gerçekleştirilmiştir. İlgili cihazın fotoğraf görüntüsü ise Şekil 17' de verilmiştir. Melt spinning işlemi, prensip olarak diğer hızlı katılaştırma işlemlerine benzemektedir. Temelde, erimiş haldeki sıvı metali soygaz yardımıyla belirli bir basınç ayarında yüksek hızda dönmekte olan disk üzerine püskürtülmesiyle, toz oluşumuna izin verilmeksizin şerit şeklinde üretilmesi esasına dayanmaktadır.



Şekil 16. Kullanılan melt spinning ünitesinin şematik resmi. 1-Disk, 2-Nozul, 3-İndüksiyon bobini, 4-Potanın mesafe ayarlama yeri, 5-Dış kapak, 6-Turbomoleküler vakum, 7-Vakum pompası, 8-İndüksiyon ısıtma ünitesi



Şekil 17. Melt spinning cihazı

Şekil 17’ de görülen melt spinning ünitesi genel itibariyle 5 ana bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler şunlardır:

- Potanın ve diskin bulunduğu vakum odası
- İndüksiyonun ısıtma ve soğutma ünitesi
- Basınçlı argon gazının bulunduğu basınçlı gaz gönderme ünitesi
- Potanın disk ile arasındaki mesafeyi ayarlamak için pota hareket mekanizması
- Kontrol paneli

Vakum odası: ergitme ünitesi, indüksiyon bobini, hegzagonal bor nitrür pota, bakır disk ve sıvı metali diske püskürtmek için basınçlı gaz gönderme sisteminin potaya bağlı olan uç kısmından oluşmaktadır. Potanın iç çapı 26 mm, dış çapı 40 mm ve boyu ise 110 mm’ dir. Potanın ucundaki nozul ise dikdörtgen şeklinde olup boyutları 0,5 x 8 mm’ dir.

İndüksiyon ünitesi: metal eritmek amacıyla kullanılan bakır boruya yüksek frekansta akım gönderen indüksiyon cihazı ile ısınan bobinleri soğutan soğutma ünitesinden oluşmaktadır. İndüksiyon bobini olarak 8 mm çapında bakır boru kullanılmış olup sarılmış

haldeki iç çapı 45 mm, dış çapı 57 mm' dir. Sarım sayısı ise 8' dir. Metal ve alaşımı ergitmek için 30 kW gücünde yüksek frekanslı indüksiyon ısıtma sistemi kullanılmaktadır. Alaşımın ergime sıcaklığı lazerli sıcaklık kontrol cihazı ile kontrol edilmektedir.

Basınçlı gaz gönderme sistemi: Yüksek saflıktaki (%99,999 saflıkta) argon gazının bulunduğu 50 lt hacimli argon tüpü ile basınçlı gaz göndermek amacıyla kullanılan iki adet basınç tüplerinden ve ayar valflerinden oluşan sistemdir. 50 lt hacmindeki argon tüpü kullanılarak deney öncesi vakum odasına argon gazı gönderilip tekrar vakum yapılmakta ve ortam atmosfer havasının oksitli etkisinden arındırılmaktadır. İki adet basınç tüpünde argon gazı depolanmakta ve deney esnasında yüksek basınçta pota içerisine gönderilerek sıvı metalin basınçlı bir şekilde disk üzerine gönderilmesi sağlanmaktadır.

Pota hareket mekanizması: Bu sistem potanın aşağı - yukarı hareketini sağlayan raylı bir mekanizmadan oluşmaktadır. Potanın hareket mesafesi sistem üzerinde bulunan bir mikrometre ile manuel olarak ayarlanabilmekte ve aynı zamanda kontrol panelinden dijital olarak da bu ayar yapılabilmektedir.

Kontrol paneli: Melt spinning ünitesinde bulunan elemanların hareketlerinin kontrol ve ayarının yapıldığı paneldir. Kontrol paneli üzerinde disk hızı, indüksiyonun açılıp kapanması, potanın aşağı - yukarı hareketi, basınçlı gaz gönderme butonları ve lazerli sıcaklık kontrol cihazı ile vakum kontrol cihazı bulunmaktadır. Tüm işlemler bu panel sayesinde ayarlanabilmektedir.

2.3. Melt Spinning Sistemi ile Farklı Parametrelerde Şerit ve Toz Üretimi

Yüksek vakum ortamında melt spinning yöntemiyle AA6060 alüminyum alaşımından toz ve şerit üretildiği bu çalışmada üretim parametrelerinin üretilen toz ve şeritlerin özelliklerine etkileri incelenmiştir. AA6060 alüminyum alaşımından şerit üretmek amacıyla 270 mm çapında ve 40 mm genişliğinde yüzeyi düz, pürüzsüz disk kullanılmıştır. Disk hızı (DH), püskürtme basıncı (PB), nozul-disk arası mesafe (NDM), sıvı metal sıcaklığı (SMS) ve nozul genişliği (NG) parametrelerinin üretilen şeritlerin boyut ve mikroyapılarına etkileri incelenmiştir. İncelenen parametrelerle ilgili değerler Tablo 3' de verilmiştir. Disk hızının şerit özelliklerine etkisini incelemek amacıyla 26, 38, 46 ve 52 m/s disk hızlarında; püskürtme basıncı için 0,6, 0,8, 1 ve 1,2 bar basınçlarda; sıvı metal sıcaklığı için 700, 750, 800 ve 850 °C sıcaklıklarda; nozul-disk arası mesafe için 2, 3, 4 ve 5 mm nozul-disk arası mesafelerde ve nozul genişliğinin etkisi için dikdörtgen

şekilli nozul ile 0,5x8 mm, 0,6x8 mm, 0,8x8 mm ve 1x8 mm nozul genişliklerinde nozullar kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

Melt spinning yöntemi esas itibariyle metal şerit üretme prosesidir. Yüzeyi düzgün ve pürüzsüz disk üzerine bir soygaz basıncıyla gönderilen sıvı metal uzun şeritler halinde katılaşır. Disk yüzeyi pürüzlendirildiğinde veya dokulu hale getirildiğinde şerit yerine toz elde etmek, bir nevi atomizasyon yapmak mümkündür. Bu düşünceden yola çıkarak, bu çalışmada yüzeyi düzgün disk dışında dokulu disk üretilerek AA6060 alüminyum alaşımından toz üretimi ve üretim parametrelerinin toz boyutuna etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda, şerit üretiminde kullanılan parametrelerin benzerleri denenerak bunların toz boyutuna etkileri araştırılmıştır. Disk hızının etkisi için 26, 34, 43 ve 52 m/s disk hızlarında; 0,6, 0,8, 1 ve 1,2 bar püskürtme basınçlarında; 750-940°C arası sıvı metal sıcaklıklarında; 0,5, 1, 2 ve 3 mm nozul – disk mesafelerinde ve dairesel kesitli ve 0,7 mm sabit nozul çapında deneyler yapılmıştır. Toz üretimi ile ilgili incelenen parametrelerin tamamı Tablo 4' de gösterilmiştir.

Tablo 3. Melt spinning yöntemiyle pürüzsüz disk kullanılarak üretilen şeritlerin işlem parametreleri

Deney No	Parametreler		Püskürtme Basıncı (bar)	Nozul-Disk Mesafesi (mm)	Sıvı metal sıcaklığı (°C)	Nozul Genişliği (mm)
	Disk Hızı (m/s)	Numune Kodları				
1	DH26	26	1	1	750	0,5
2	DH38	38	1	1	750	0,5
3	DH46	46	1	1	750	0,5
4	DH52	52	1	1	750	0,5
5	PB0,6	38	0,6	1	750	0,5
6	PB0,8	38	0,8	1	750	0,5
7	PB1	38	1	1	750	0,5
8	PB1,2	38	1,2	1	750	0,5
9	NDM2	46	0,8	2	700	0,6
10	NDM3	46	0,8	3	700	0,6
11	NDM4	46	0,8	4	700	0,6
12	NDM5	46	0,8	5	700	0,6
13	SMS700	38	1	1	700	0,5
14	SMS750	38	1	1	750	0,5
15	SMS800	38	1	1	800	0,5
16	SMS850	38	1	1	850	0,5
17	NG0,5	38	1	1	750	0,5
18	NG0,8	38	1	1	750	0,8
19	NG1	38	1	1	750	1

Tablo 4. Melt spinning yöntemiyle dokulu disk kullanılarak üretilen tozların işlem parametreleri

Deney No	Parametreler		Püskürtme Basıncı (bar)	Nozul-Disk Mesafesi (mm)	Sıvı metal sıcaklığı (°C)	Nozul Genişliği (mm)
	Disk Hızı (m/s)	Numune Kodları				
1	DH26	26	1	1	750-800	0,7
2	DH34	34	1	1	750-800	0,7
3	DH43	43	1	1	750-800	0,7
4	DH52	52	1	1	750-800	0,7
5	PB0,6	34	0,6	1	750-800	0,7
6	PB0,8	34	0,8	1	750-800	0,7
7	PB1	34	1	1	750-800	0,7
8	PB1,2	34	1,2	1	750-800	0,7
9	NDM0,5	43	0,6	0,5	800-850	0,7
10	NDM1	43	0,6	1	800-850	0,7
11	NDM2	43	0,6	2	800-850	0,7
12	NDM3	43	0,6	3	800-850	0,7
13	SMS750-800	34	1	1	750-800	0,7
14	SMS800-850	34	1	1	800-850	0,7
15	SMS850-900	34	1	1	850-900	0,7
16	SMS900-940	34	1	1	900-940	0,7

2.4. şerit Kalınlıklarının Ölçümleri ve Ortalama Toz Boyutu Hesaplamaları

Üretilen şeritlerin kalınlıkları 0.001mm hassasiyette bir dijital mikrometre ile ölçülmüştür. Ölçüm işleminde çok sayıda şeridin kalınlıkları ölçülerek bunların ortalaması alınmıştır.

Üretilen tozların ortalama toz boyutu ölçümü için Malvern Mastersizer 2000 model parçacık boyut analiz cihazı kullanılmıştır. Her bir deneyden elde edilen tozların 250 µm elek altına geçenler hesaba katılmış, bu tozlardan konileme-dörtleme yöntemiyle uygun

şekilde toz numune alınarak ilgili cihazda d_{50} , d_{10} , ve d_{90} boyut değerleri hesaplanmış ve kümülatif boyut dağılım grafikleri çizilmiştir.

2.5. Üretilen Şerit ve Tozların Morfoloji ve Mikroyapı İncelemeleri

Üretilen AA6060 alüminyum alaşımı şeritlerinin morfoloji incelemeleri için Leica DM 4000 model optik mikroskop kullanılmıştır. Bu şeritlerin yüzeylerinin ve mikroyapılarının incelemeleri için Zeiss EVO LS10 model taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılmıştır. Bu işlem için değişik kalınlıktaki ve boyutlardaki şeritler, enine kesitten klips yardımıyla soğuk sertleşen epoksi reçinede yataklanmış ve katı hale gelene kadar beklenmiştir. Bakalitler sırasıyla 800, 1000, 1200, 1500 ve 2000 numaralı zımparalarla taşlandıktan 1µm' lik alümina solüsyonla parlatılmıştır. Parlatılan numuneler %10 sodyum hidroksit çözeltisi (10 g NaOH, 90 ml saf su) ile 20-90 saniye dağlanmıştır. Optik mikroskopta yapılan ön incelemelerin ardından numuneler SEM incelemeleri için altın kaplanmıştır. Eleme sonucu her bir elek aralığından alınan AA6060 alüminyum tozlar çift taraflı karbon bandına yataklanarak morfoloji incelemeleri için hazır hale getirilmiştir. Tozların mikroyapı incelemelerinde şeritler için uygulanan aynı reçine içine yataklandırma ve aynı metalografik numune hazırlama çalışmaları yapılmıştır. Morfoloji ve mikroyapı incelemelerinin tamamı SEM'de gerçekleştirilmiştir.

3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Melt Spinning Parametrelerinin Ortalama Şerit Kalınlığına Etkisi

Bu çalışmada, melt spinning yöntemiyle AA6060 alüminyum alaşımı şeritleri Bölüm 2.3’ de açıklanan melt spinning parametreleri ile üretilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde, parametrelere bağlı olarak 1-2 m uzunluğunda, 28-171 µm kalınlıkta ve 4-8 mm genişlikte şeritler üretilmiştir. Üretilen şeritlerden bazı örnekler Şekil 18’ de gösterilmiştir. Elde edilen şeritlerden diske temas eden alt yüzeylerinin SEM’ de çekilen görüntüleri Şekil 19’ da verilmiştir. Şeritlerin disk ile temas eden alt yüzeylerinde mikro düzeyde çukurcukların oluştuğu gözlenmiştir. Bu çukurcukların disk yüzey pürüzlülüğü, sıvı alaşım yüzey gerilmesi ve disk – şerit ara yüzeyindeki zayıf ısı transferi bölgelerini temsil eden hava cepleri olduğu düşünülmektedir [41, 118, 119]. Şeritlerin hava ile temas eden serbest yüzeylerinde sıvı metalin disk üzerinden akarken şekillendiği düşünülen boylamasına çizgisel çıkıntılar bulunmaktadır (Şekil 20).

Melt spinning yönteminde şeritlerin mikroyapı, soğuma hızı ve mekanik özellikler üzerinde en etkili olan boyutu kalınlıklarıdır. Bölüm 2.3’ de açıklanan melt spinning parametrelerinin şerit kalınlığına etkisini gösteren grafikler Şekil 21-25’ de verilmiştir. Yapılan bu çalışmalarda melt spinning parametrelerinden herhangi biri denenirken diğer parametreler sabit tutulmuştur.

Disk hızının şerit kalınlığına etkisi 26–52 m/s arasında değişen disk hızlarında incelenmiştir. 26, 38, 46 ve 52 m/s disk hızlarında yapılan deneylerde ortalama şerit kalınlıkları sırasıyla 119, 87, 80 ve 60 µm olarak elde edilmiştir (Şekil 21). Artan disk hızıyla ortalama şerit kalınlığı azalmıştır. Bu durum sıvı metale verilen enerji ile alakalıdır. Artan disk hızıyla sıvı metale aktarılan santrifüj kuvvet artacağından disk üzerine akıtılan sıvı metalin kalınlığı azalarak daha ince şeritler elde edilir [67, 76, 80, 82, 88, 120, 121].

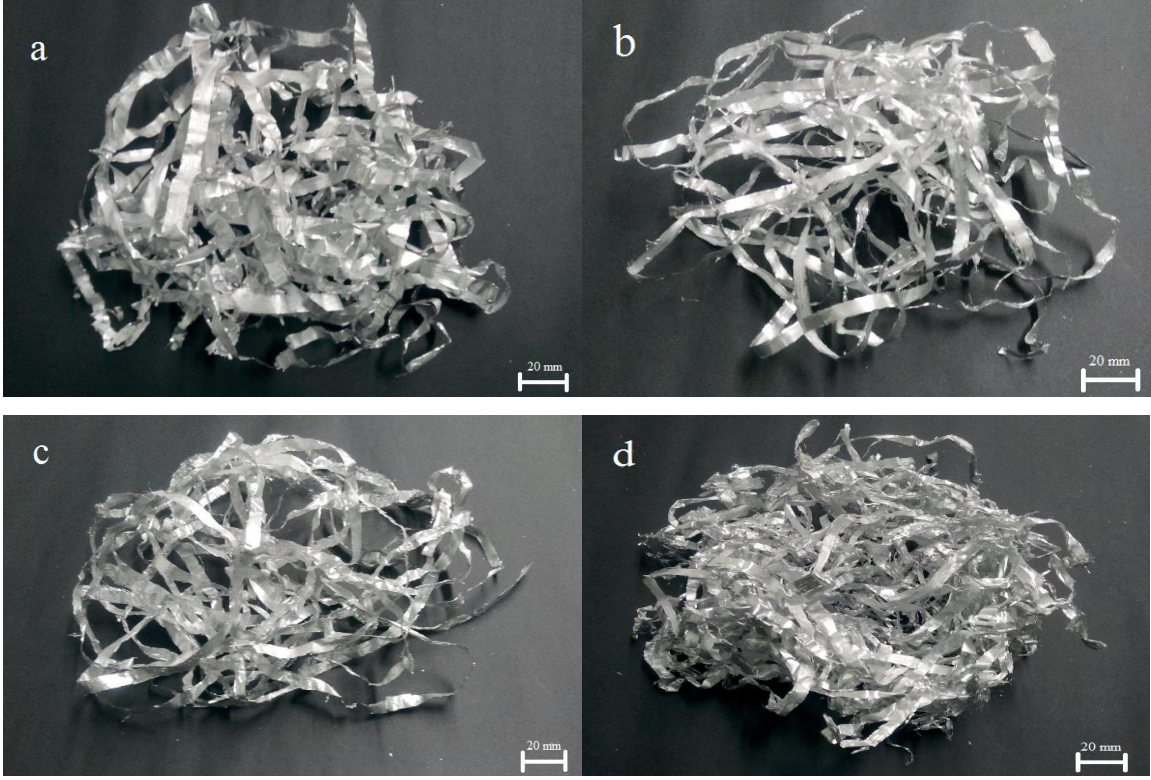
Püskürtme basıncının şerit kalınlığına etkisi Şekil 22’ de gösterilmiştir. 0,6, 0,8, 1 ve 1,2 bar püskürtme basınçlarında yapılan deneylerde, ortalama şerit kalınlıkları sırasıyla 56, 67, 87 ve 92 µm olarak elde edilmiştir. Püskürtme basıncının artmasıyla şerit kalınlığının arttığı açıkça görülmektedir. Artan püskürtme basıncıyla disk üzerinde oluşan sıvı metal

havuzunun kalınlığı artmakta, daha fazla metal disk üzerine yığılmakta ve neticede daha kalın şeritler elde edilmektedir [80-82].

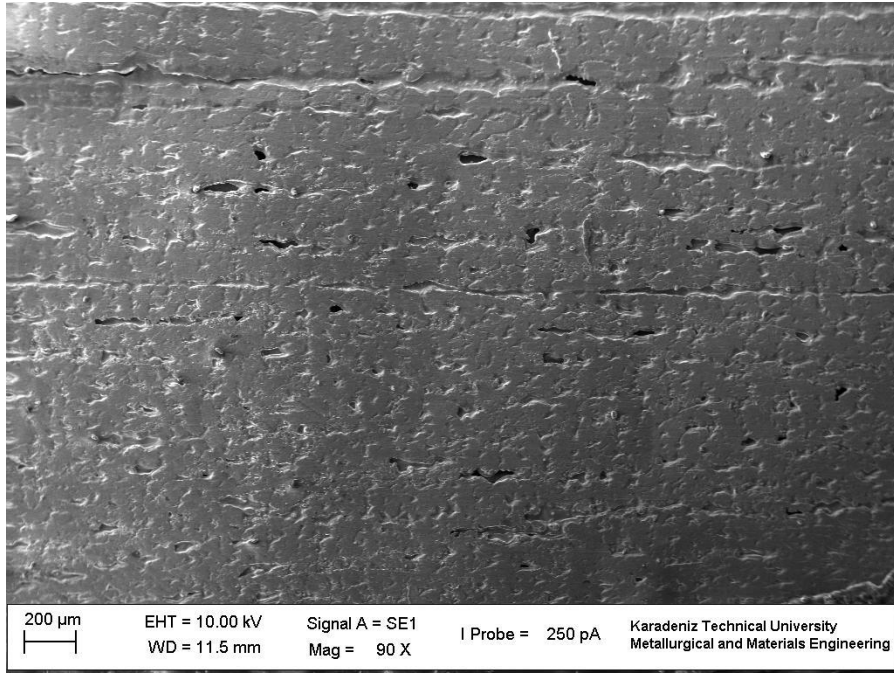
Sıvı metal sıcaklığının şerit kalınlığına etkisi 700 – 850 °C arasında değişen püskürtme sıcaklıklarında incelenmiştir. 700, 750, 800 ve 850 °C püskürtme sıcaklıklarında yapılan deneylerde ortalama şerit kalınlıkları sırasıyla 93, 87, 62 ve 55 µm olarak elde edilmiştir (Şekil 23). Artan sıvı metal sıcaklığı ile şerit kalınlığı azalmaktadır. Sıcaklığın artması ile sıvı metalin viskozitesi azaltmakta, daha ince şerit oluşumu kolaylaşmaktadır. Artan sıvı metal sıcaklığıyla şerit kalınlığının azalması bunu doğrulamaktadır [80, 86, 87].

Nozul-disk arası mesafenin şerit kalınlığına etkisini gösteren grafikler Şekil 24’de verilmiştir. Bu çalışmada 2, 3, 4 ve 5 mm nozul-disk arası mesafe denenmiştir. Artan mesafe ile şerit kalınlığının arttığı tespit edilmiştir. 2, 3, 4 ve 5 mm nozul-disk arası mesafelerinde yapılan deneylerde ortalama şerit kalınlıkları sırasıyla 71, 74, 77 ve 88 µm olarak elde edilmiştir. Nozul – disk mesafesinin artması eriyiğin akış hızını arttıracığından dolayı eriyik havuzu genişleyeceğinden şerit kalınlığı artmaktadır [82].

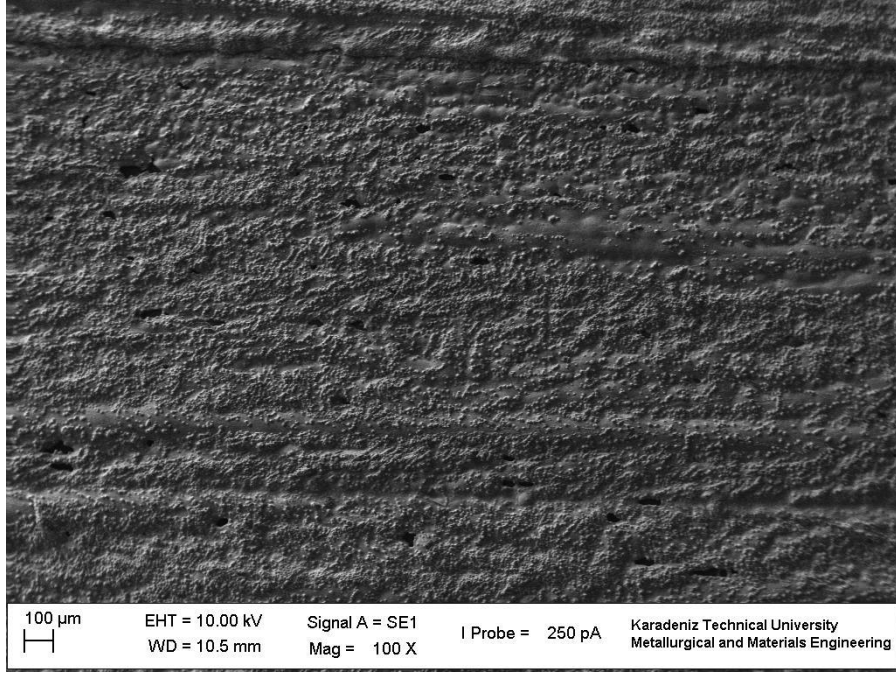
Bu çalışmada dikdörtgen kesitli sıvı metal akış nozulu kullanılmış, nozul uzunluğu 8 mm olarak sabitlenmiş ve nozul genişliği 0,5, 0,8 ve 1 mm değerlerinde denenerek nozul genişliğinin şerit kalınlığına etkisi incelenmiştir. Şekil 25’ den görüldüğü üzere, artan nozul genişliği ile şerit kalınlığı artmıştır. 0,5, 0,8 ve 1 mm nozul genişliklerinde yapılan deneylerde ortalama şerit kalınlıkları sırasıyla 87, 119 ve 130 µm olarak elde edilmiştir. Artan nozul genişliği ile sıvı metalin debisinin arttığı bunun da şerit kalınlığını arttırdığı anlaşılmaktadır [48, 90, 122].



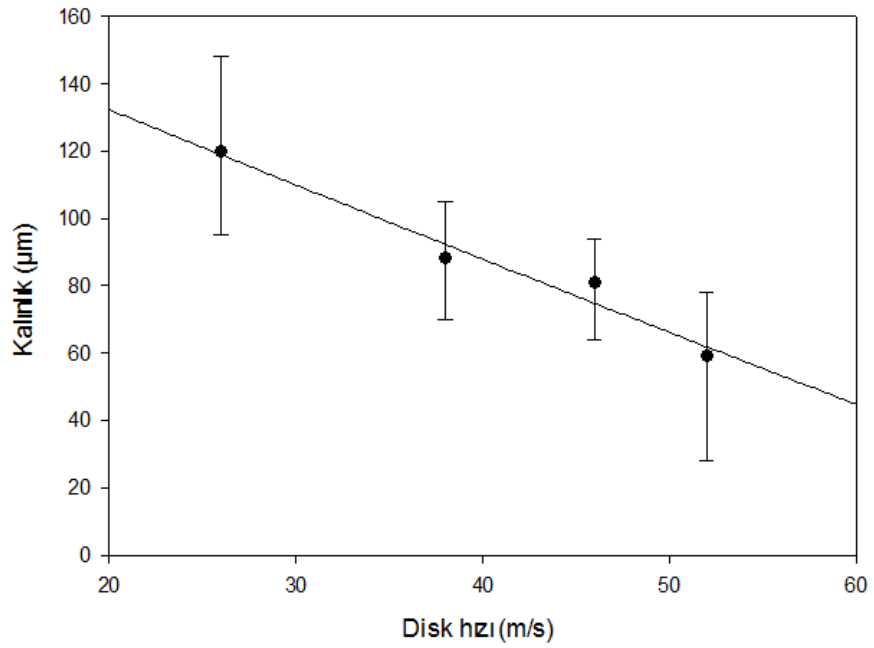
Şekil 18. Üretilen AA6060 alüminyum alaşımı şeritler (a.DH30, b. PB0,6, c. NDM3, d. SMS800 kodlu numune)



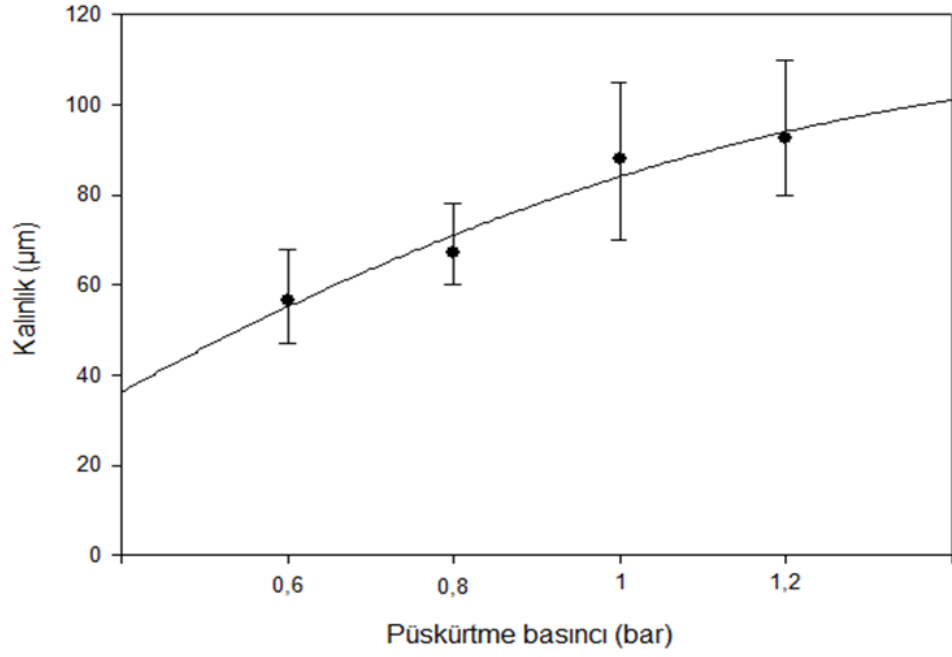
Şekil 19. Üretilen şeritlerin disk ile temas eden yüzeylerinin görüntüsü



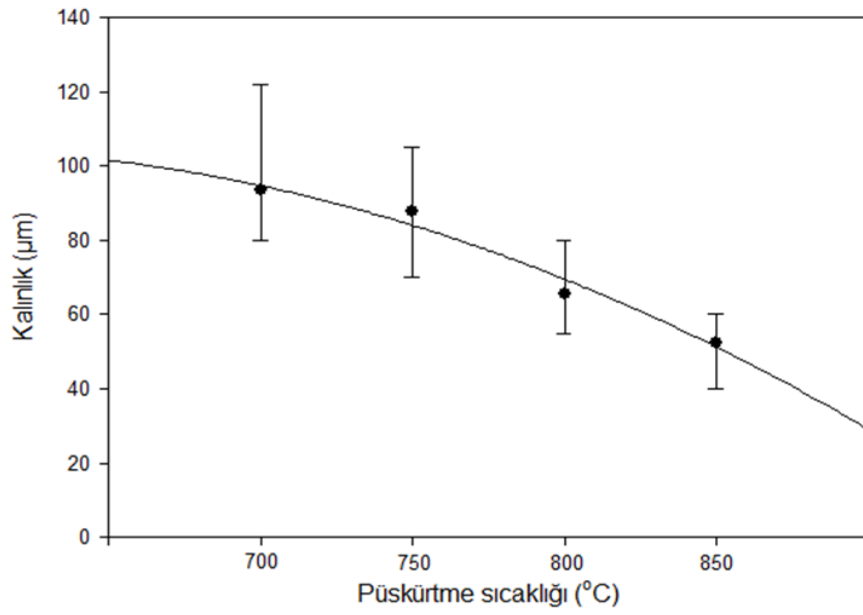
Şekil 20. Üretilen şeritlerin hava ile temas eden yüzeyinin görüntüsü



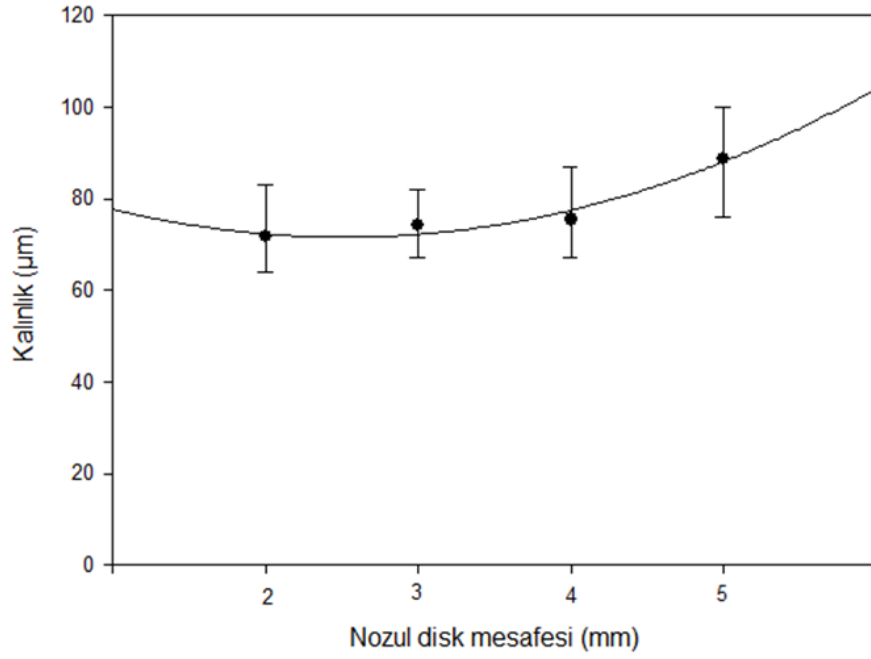
Şekil 21. Disk hızının şerit kalınlığına etkisi (PB: 1bar, NDM: 1mm, SMS: 750°C, NG: 0,5mm sabit tutulmuştur)



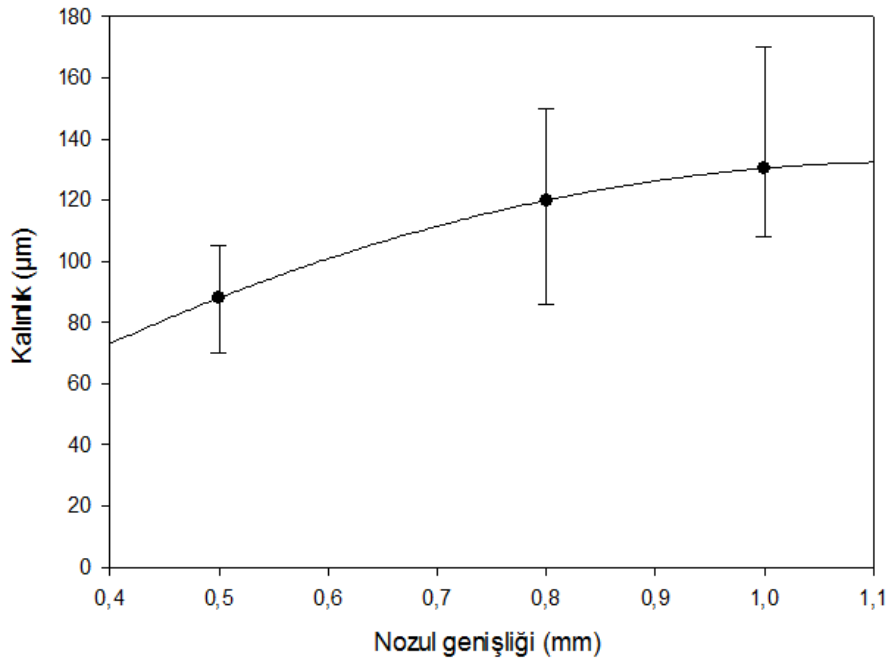
Şekil 22. Şerit kalınlığının püskürtme basıncıyla değişimi (DH: 38m/s, NDM: 1mm, SMS: 750°C, NG: 0,5mm sabit tutulmuştur)



Şekil 23. Sıvı metal sıcaklığının şerit kalınlığına etkisi (DH: 38m/s, PB: 1bar, NDM: 1mm, NG: 0,5mm sabit tutulmuştur)



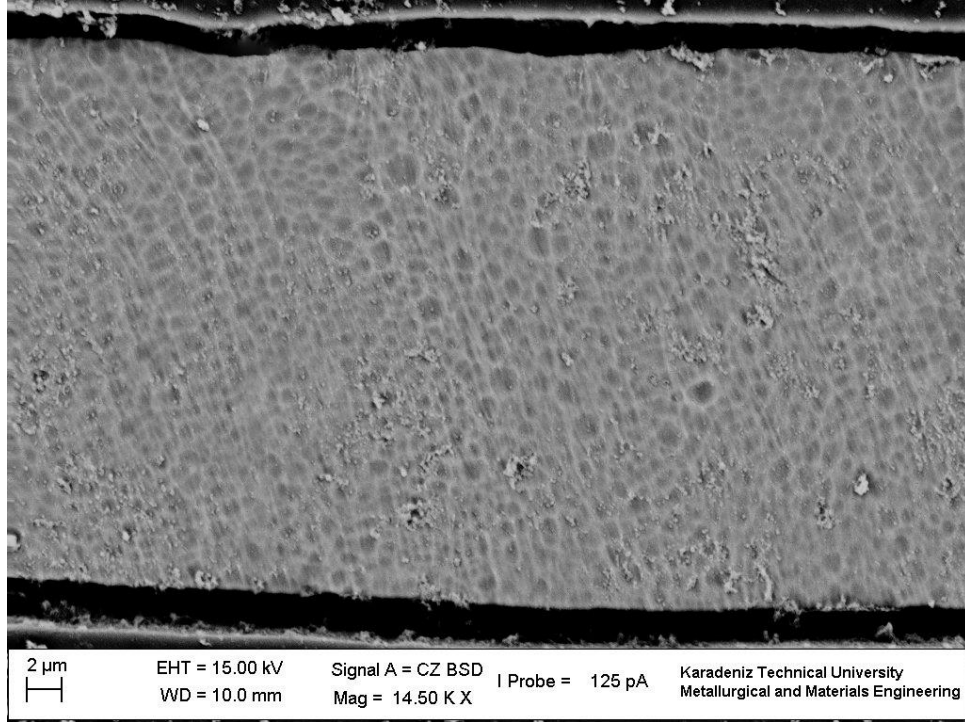
Şekil 24. Nozul-disk arası mesafe ile şerit kalınlığının değişimi (DH: 46 m/s, PB: 1 bar, SMS: 700°C, NG: 0,6mm)



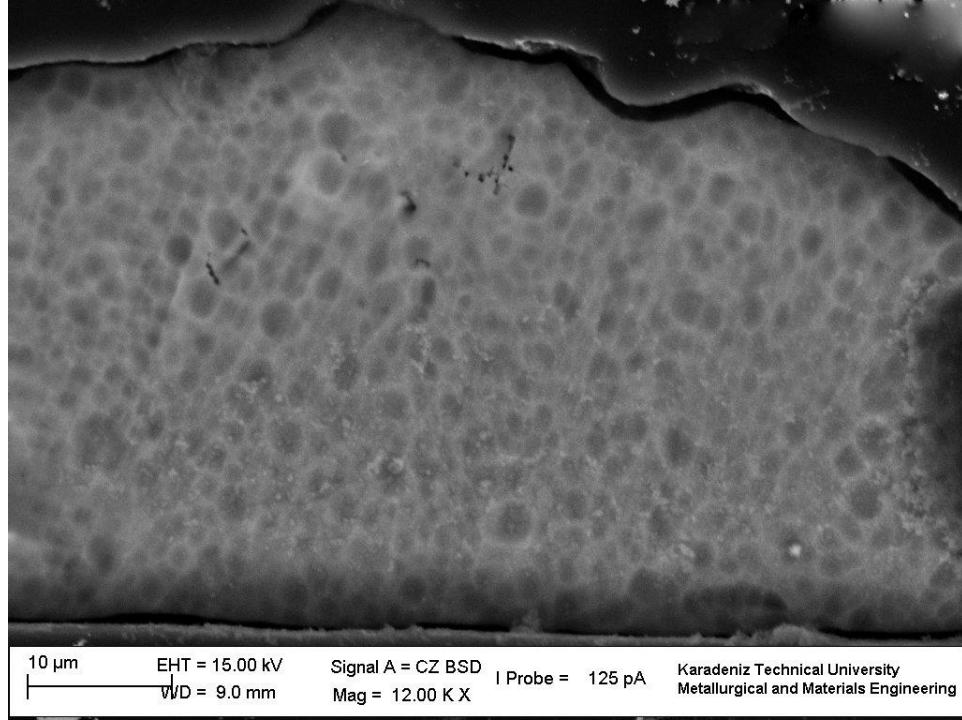
Şekil 25. Şerit kalınlığının nozul genişliği ile değişimi (DH: 38m/s, PB: 1bar, NDM: 1mm, SMS: 750°C)

3.2. Üretilen Şeritlerin Mikroyapıları

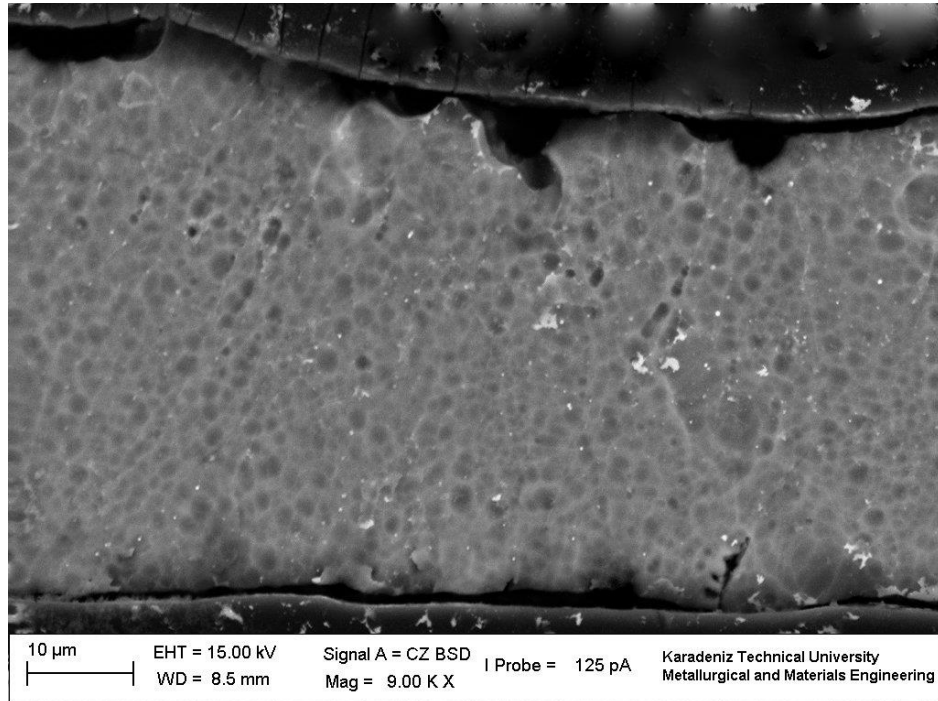
Şekil 26-30' de üretilen AA6060 alüminyum alaşımından üretilen 30, 41, 50, 60 ve 92 µm kalınlıklara sahip şeritlere ait mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi, şerit kalınlığı arttıkça tane boyutları da artmaktadır. Şeritlerde diske temas eden yüzey ile serbest yüzeyin mikroyapı tane boyutları arasında belirgin bir fark gözlenmemiştir. Yapılan incelemede, şerit kalınlığının azalmasıyla ortalama tane boyutu azalmıştır. 30, 41, 50, 60 ve 92 µm kalınlıklardaki şeritler için ortalama tane boyutları sırasıyla 1,7, 2, 2,3, 3 ve 4,1 µm olarak hesaplanmıştır. Tane boyutuna bağlı olarak soğuma hızları, Bölüm 1.6' da 6000 serisi alüminyum alaşımları için verilmiş olan (5) nolu eşitlik ile hesaplanmıştır [113, 114]. Şerit kalınlığına bağlı tane boyutu ve tane boyutuna bağlı soğuma hızı (9) değerleri Tablo 5' de ve Şekil 31 ve 32' de verilmiştir. Farklı kalınlıklarda şeritler için hesaplanan 1,7, 2, 2,3, 3 ve 4,1 µm tane boyutlarına karşılık gelen soğuma hızları sırasıyla $9,20 \times 10^3$, $6,05 \times 10^3$, $4,23 \times 10^3$, $2,14 \times 10^3$, $0,96 \times 10^3$ K/s olarak bulunmuştur. Şerit kalınlığı ile soğuma hızı arasındaki ilişki literatürde yapılan benzer çalışmalarla da ortaya konmuştur ve şerit kalınlığının azalması ile soğuma hızının arttığı belirtilmiştir [120, 123, 124].



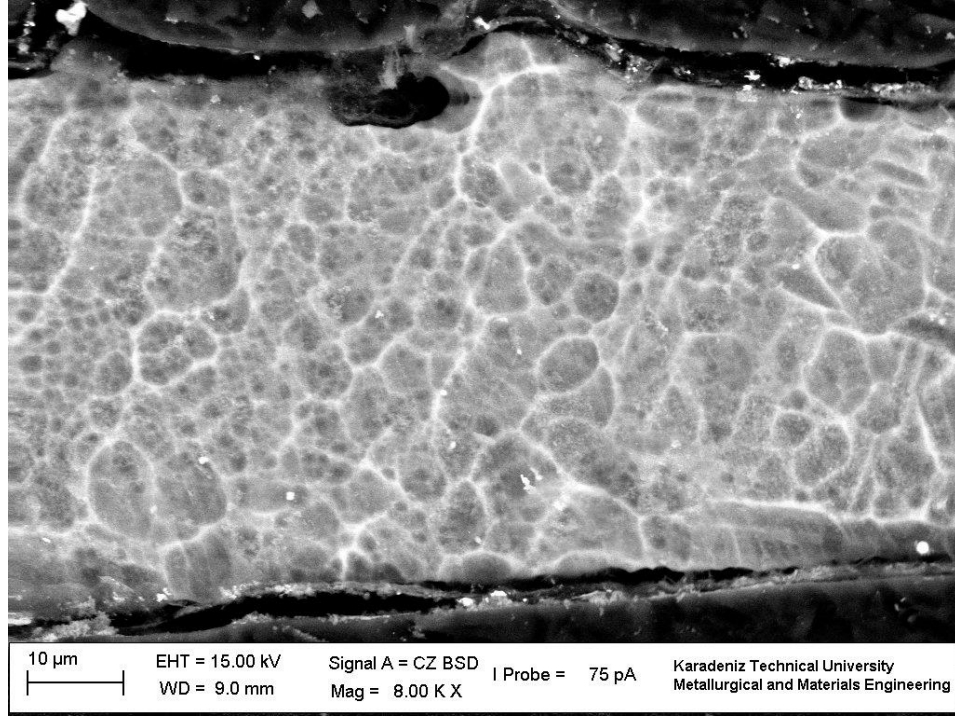
Şekil 26. AA6060 alüminyum alaşımı şeridi mikroyapısı (şerit kalınlığı 30 µm)



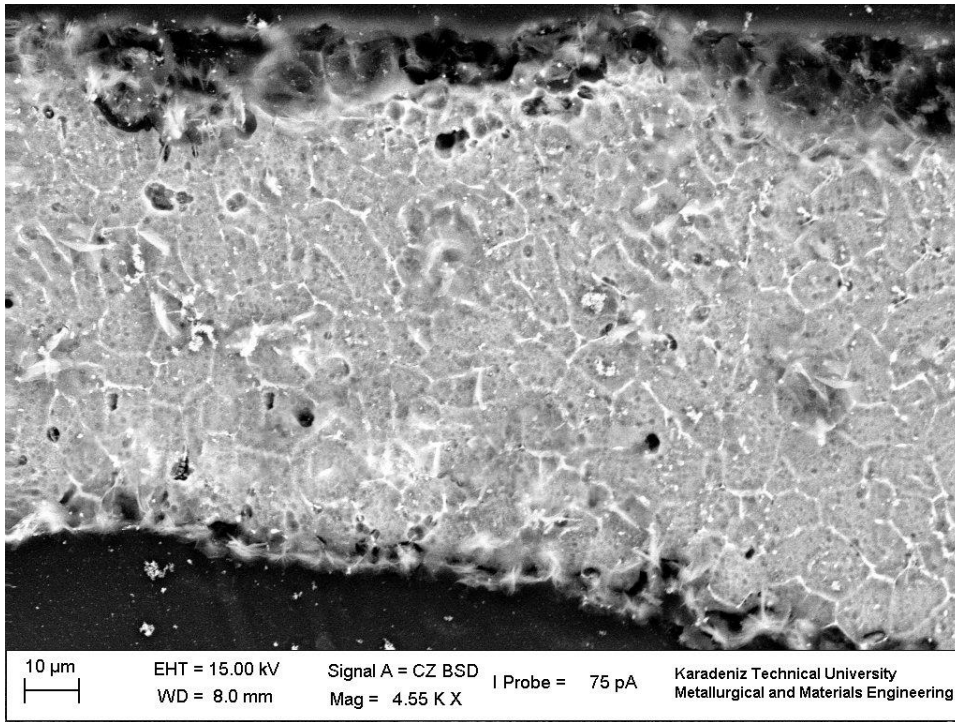
Şekil 27. AA6060 alüminyum alaşımı şeridi mikroyapısı (şerit kalınlığı 41 μm)



Şekil 28. AA6060 alüminyum alaşımı şeridi mikroyapısı (şerit kalınlığı 50μm)



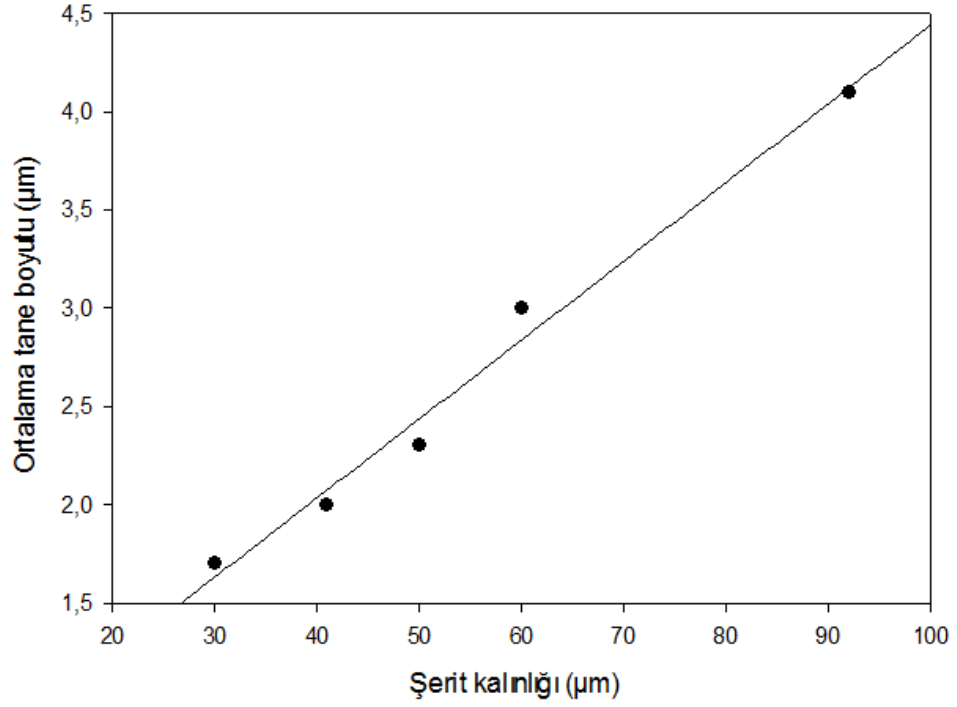
Şekil 29. AA6060 alüminyum alaşımı şeridi mikroyapısı (şerit kalınlığı 60μm)



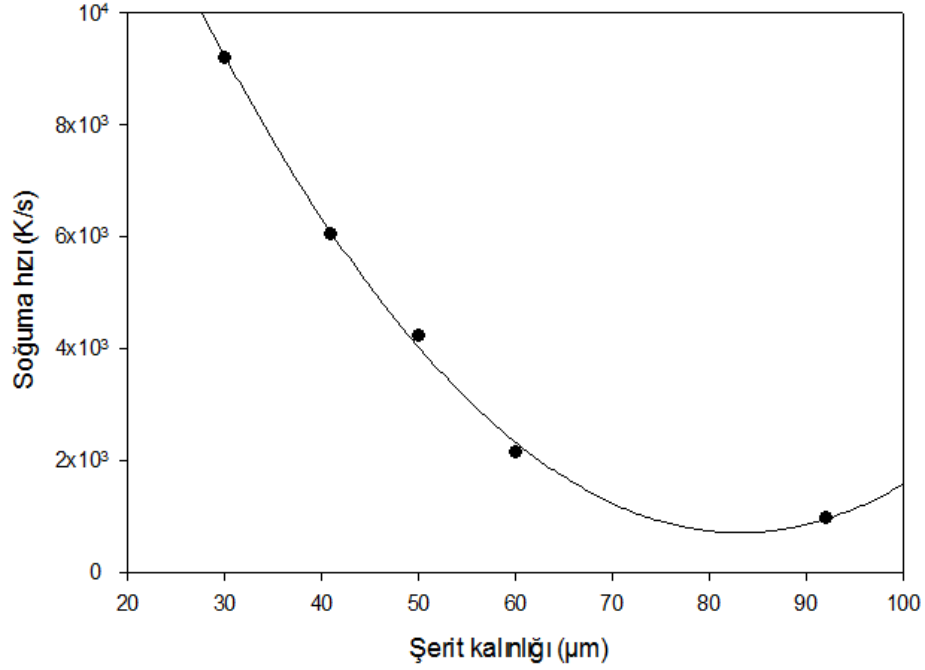
Şekil 30. AA6060 alüminyum alaşımı şeridi mikroyapısı (şerit kalınlığı 92μm)

Tablo 5. AA6060 alüminyum alaşımı şeritlerde şerit kalınlığına bağlı olarak tane boyutu ve soğuma hızının değişimi

Şerit kalınlığı (μm)	Tane boyutu (μm)	Soğuma hızı (K/s)
30	1,7	$9,20 \times 10^3$
41	2	$6,05 \times 10^3$
50	2,3	$4,23 \times 10^3$
60	3	$2,14 \times 10^3$
92	4,1	$0,96 \times 10^3$



Şekil 31. AA6060 alüminyum alaşımı şeritlerde şerit kalınlığına bağlı tane boyutu değişimi



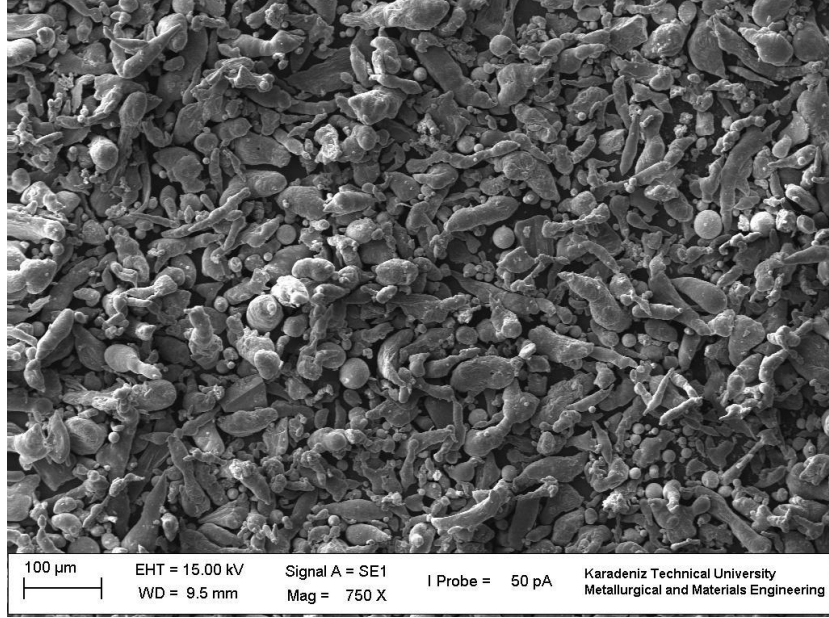
Şekil 32. AA6060 alüminyum alaşımı şeritlerde şerit kalınlığı ile soğuma hızı değişimi

3.3. Üretilen Tozların Morfolojileri

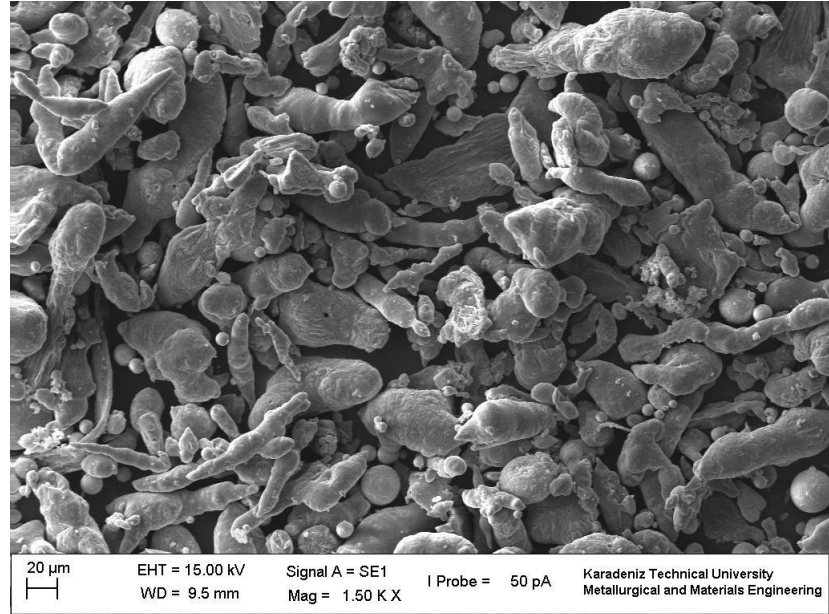
Melt spinning yöntemi literatürde bilinen şekli ile metal şerit üretme yöntemidir. Üretilen şeritler doğrudan herhangi bir ikincil işlem gerekmeksizin, doğrudan şerit halinde kullanılırlar. Bir diğer yöntem ise bu şeritleri bilyalı değirmenlerde öğütüp toz haline getirip, toz metalürjisi prosesleriyle kullanışlı parça haline getirilir. Yapılan literatür araştırmasında melt spinning yöntemiyle toz üretim çalışmalarına rastlanmamıştır. Şerit üretiminde kullanılan yüzeyi düzgün ve pürüzsüz diskin, yüzeyinin pürüzlendirilmesi ya da dokulu hale getirilmesi durumunda şerit yerine, sıvı metali atomize ederek toz üretir [125-127]. Bu düşünceden hareketle bu çalışmada disk yüzeyine dış açılarak dokulu disk elde edilmiş ve AA6060 alüminyum alaşımı atomize edilmiştir. Yapılan işlemde başarılı sonuç alınmış ve şerit yerine doğrudan toz elde edilmiştir.

Bu çalışmada üretilen AA6060 tozlarının genellikle ligamental, çubuksu, pulsu, yapraksı ve düzensiz şekilde olduğu, toz şekillerinin parçacık boyutunun artması ile çubuksu tozların yapraksı ve pulsu tozlara dönüşmeye başladığı gözlemlenmiştir. Disk hızı, püskürtme basıncı, sıvı metal sıcaklığı ve nozul-disk mesafesi vb. melt spinning

parametrelerinin toz şeklini etkilemediği gözlenmiştir. Toz boyutu arttıkça toz yüzeylerinde çekilme boşluklarına rastlanmıştır. Üretilen tozlardan değişik elek aralıklarından alınan numunelerden çekilen SEM görüntüleri Şekil 33-38’ de verilmiştir.

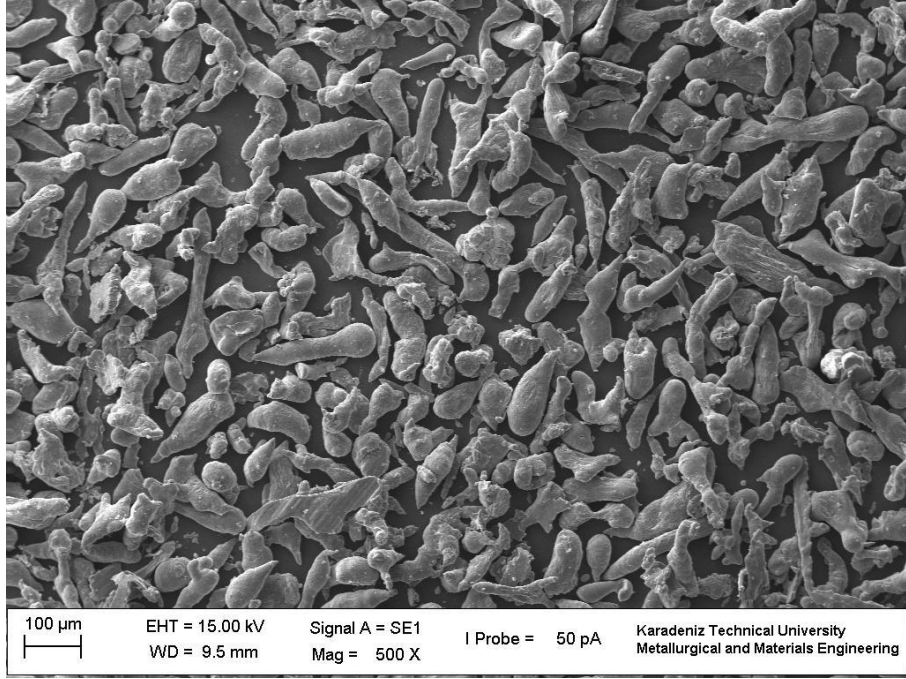


(a)

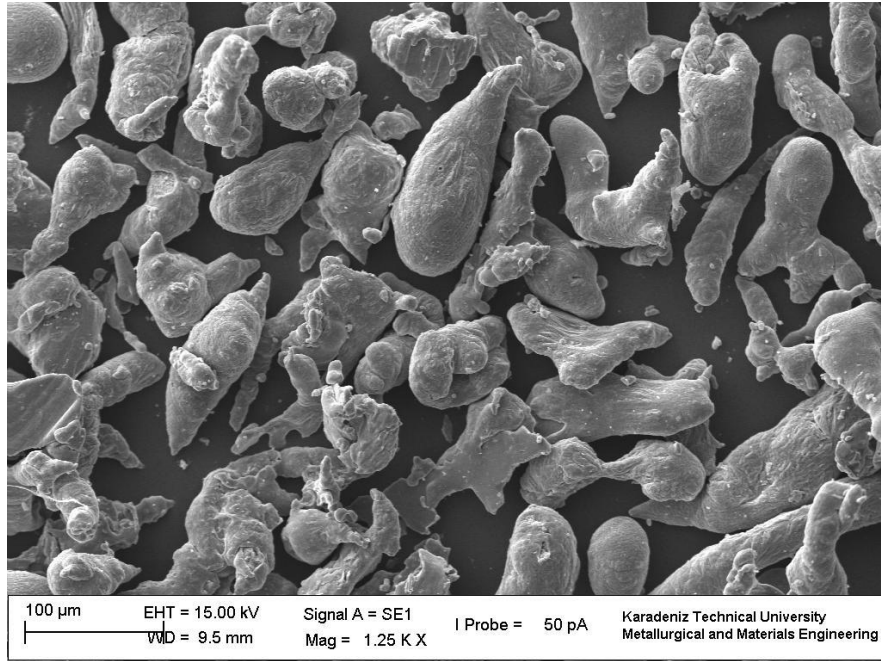


(b)

Şekil 33. Üretilen AA6060 alüminyum alaşımı (-45/+36) elek aralığı tozlar
a)normal, b)büyütülmüş

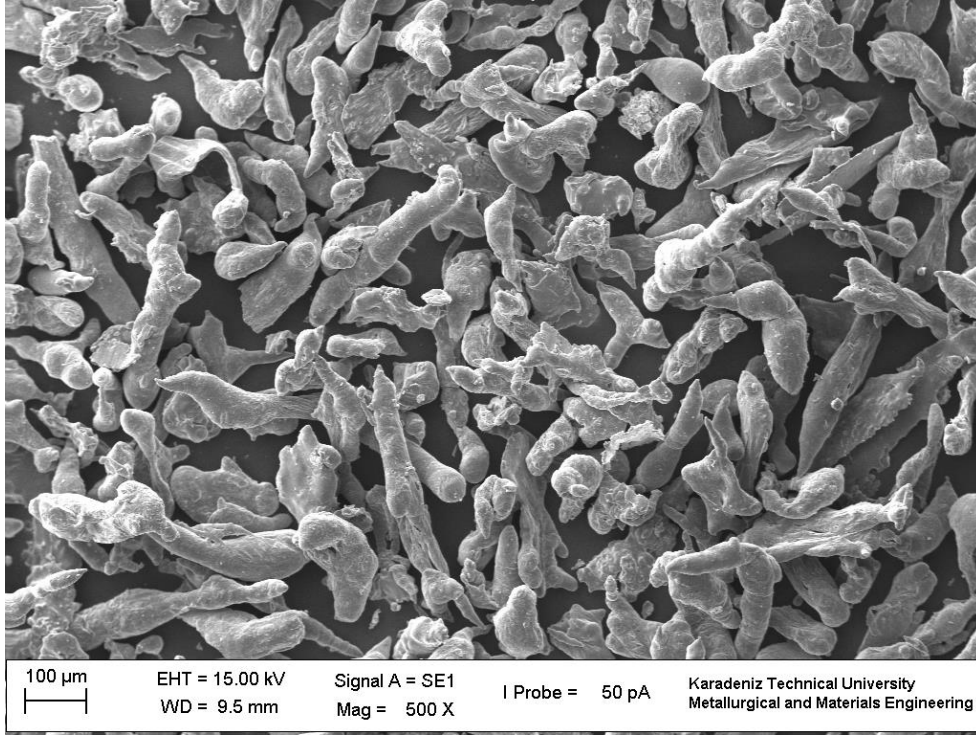


(a)

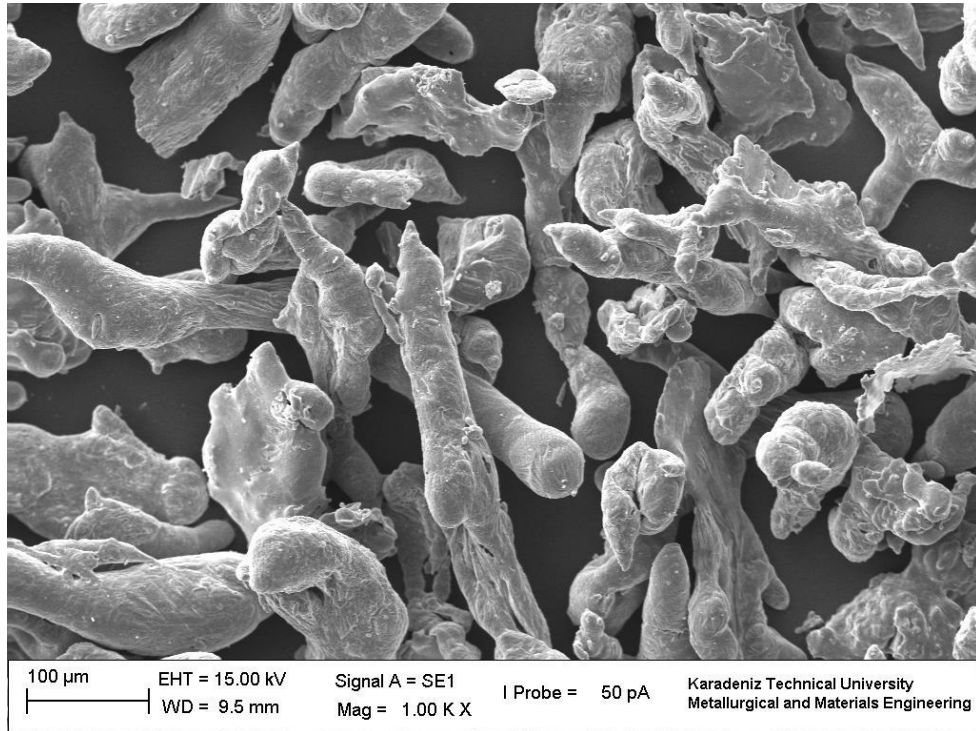


(b)

Şekil 34. Üretilen AA6060 alüminyum alaşımı (-63/+45) elek aralığı tozlar
a)normal, b)büyütülmüş

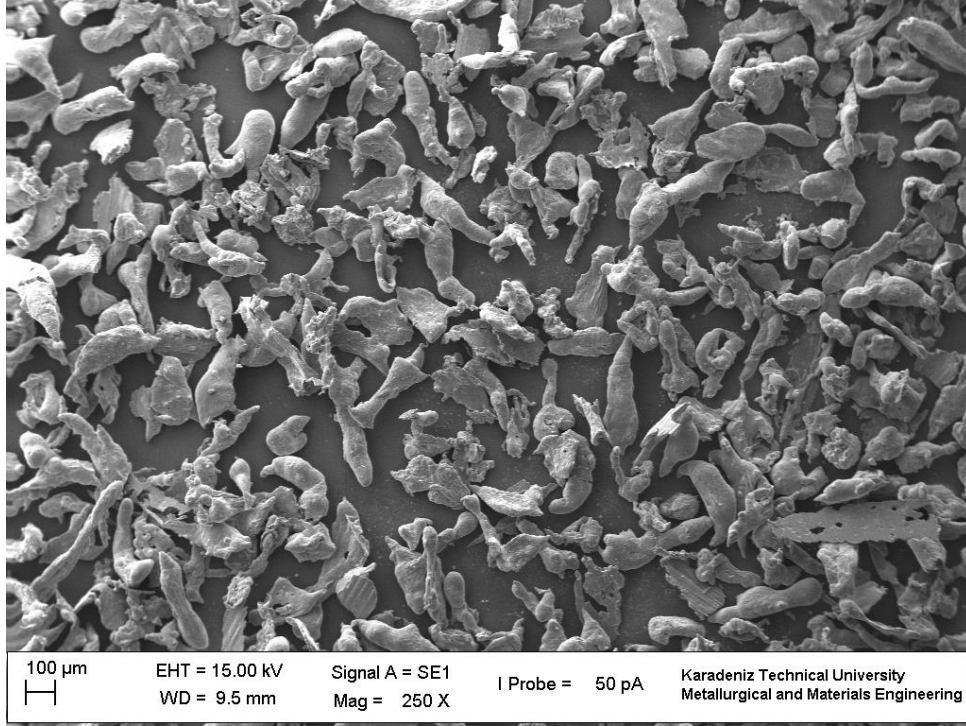


(a)

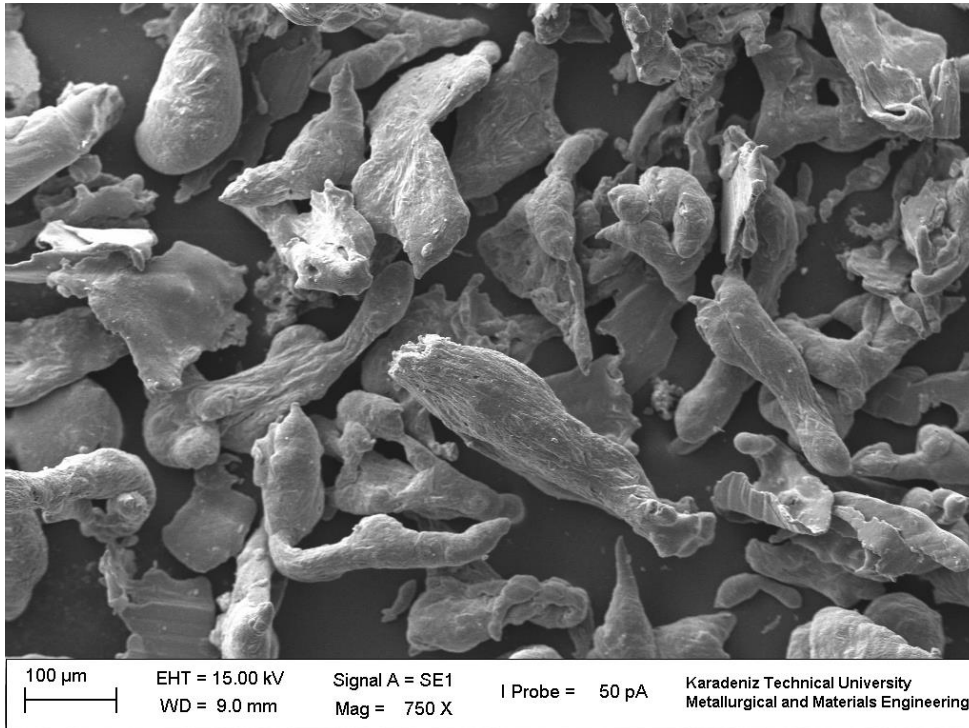


(b)

Şekil 35. Üretilen AA6060 alüminyum alaşımı (-90/+63) µm elek aralığı tozlar
a)normal, b)büyütülmüş

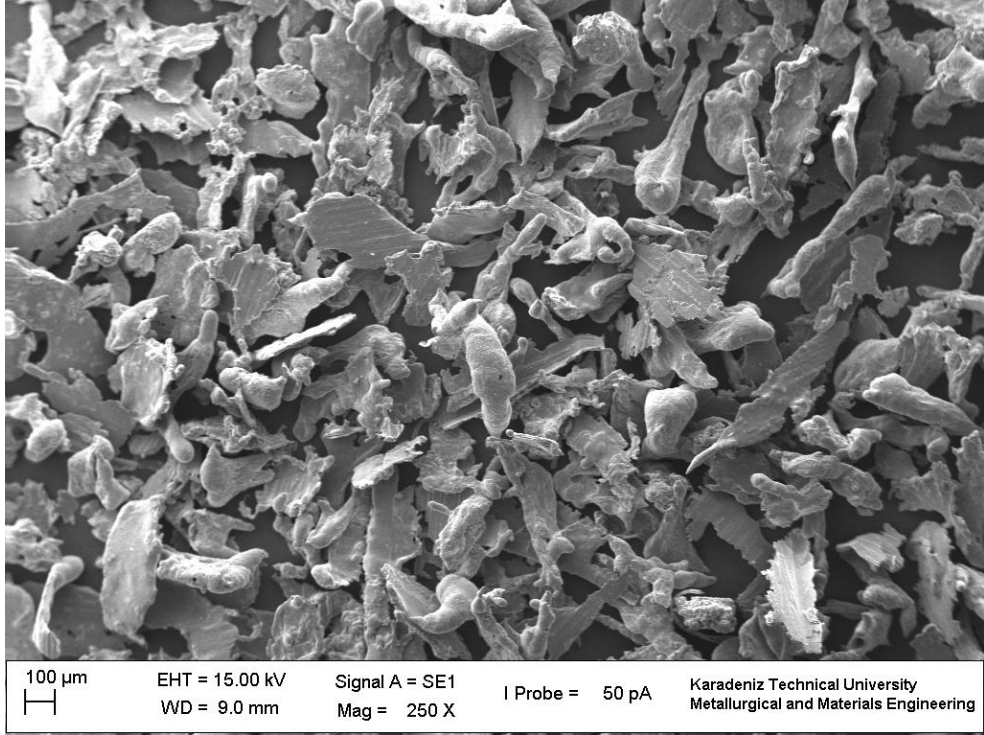


(a)

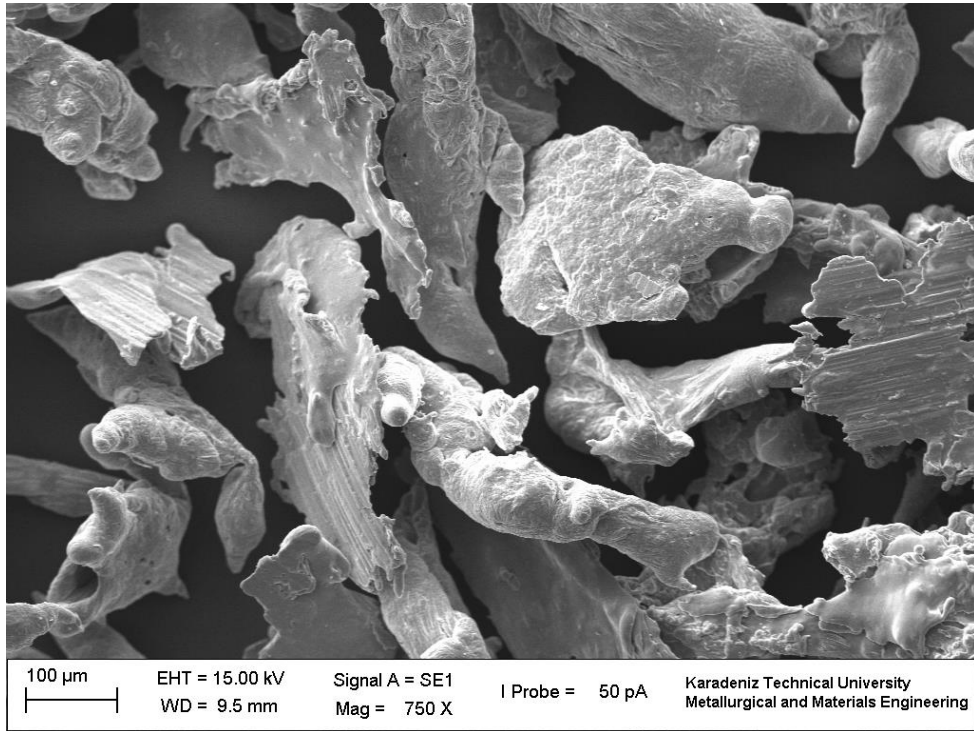


(b)

Şekil 36. Üretilen AA6060 alüminyum alaşımı (-125/+90) μ m elek aralığı tozlar
a)normal, b)büyütülmüş

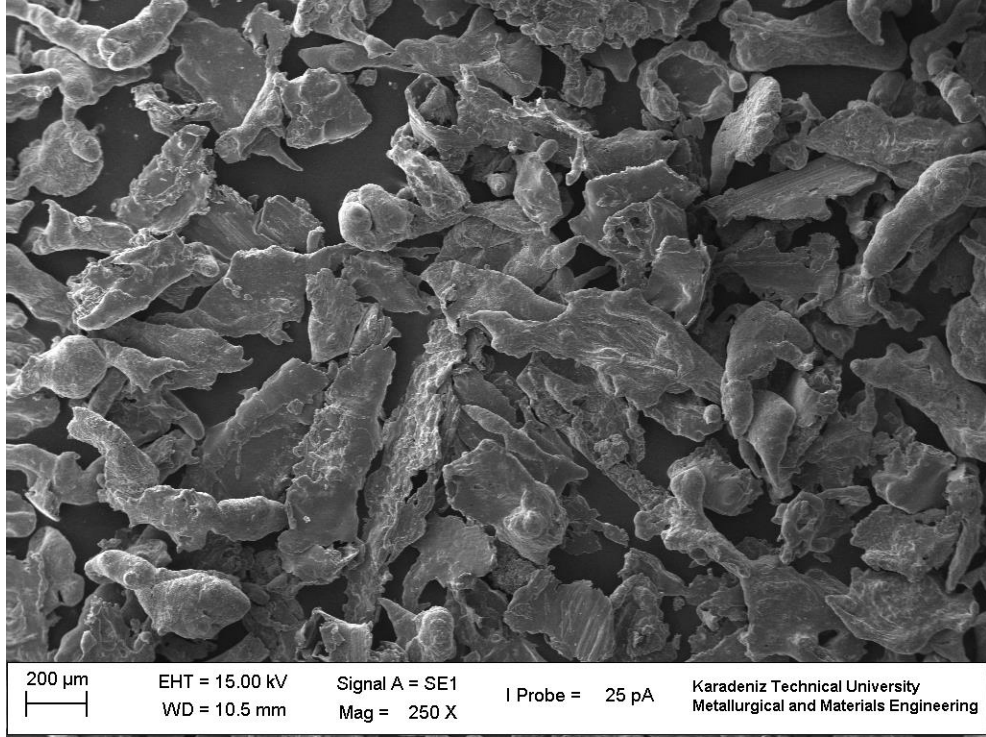


(a)

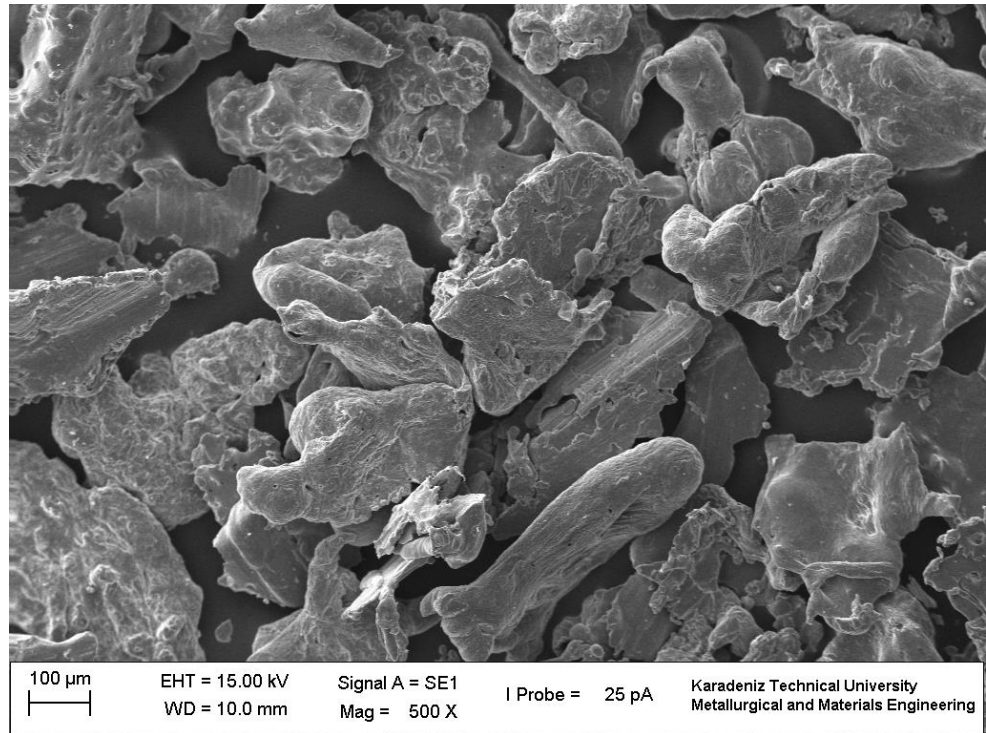


(b)

Şekil 37. Üretilen AA6060 alüminyum alaşımı (-180/+125) µm elek aralığı tozlar
a)normal, b)büyütülmüş



(a)



(b)

Şekil 38. Üretilen AA6060 alüminyum alaşımı (-250/+180) μ m elek aralığı tozlar
a)normal, b)büyütülmüş

3.4. Üretim Parametrelerinin Boyut Dağılımına ve Ortalama Toz Boyutuna Etkisi

Bölüm 3.1’ de açıklanan üretim parametrelerinin toz boyut dağılımına ve ortalama toz boyutuna etkisini araştırmak amacıyla atomizasyon deneyleri yapılmıştır. Elde edilen tozlardan 250 µm elek altına geçenler değerlendirmeye alınmıştır. Konileme-dörtleme yöntemiyle elde edilen tozlardan örnekler alınarak, lazerli toz boyut analiz cihazında (mastersizer) frekans grafikleri ile kümülatif boyut dağılımı grafikleri elde edilmiştir. Kümülatif boyut dağılımı grafiklerinde %50 kümülatif noktaya karşılık gelen değer ortalama toz boyutu (d_{50}) olarak alınmıştır. Bulunan sonuçlar Şekil 39-46’ da verilmiştir.

Bu çalışmada atomizasyon sonrası 250 µm elek altına geçen tozlar boyut hesaplamalarında kullanılmasına rağmen, Şekil 39-46 incelendiğinde, boyut dağılımı eğrilerinin çoğunlukla 250 µm üstünde olduğu görülecektir. Oysa 250 µm üzerinde tozların olmaması gerekirdi. Bunun sebebi tozların şekli ile açıklanabilir. Şekil 33-38’ den de görüldüğü üzere tozlar genellikle çubuksu şekle sahiptirler. Eleme işleminde tozlar elek altına en küçük boyutlarından, yani çubuk çapından geçmektedir. Tozun eşdeğer çapı eleme işleminde hesaba katılamamaktadır. Aynı tozların lazerli parçacık analiz cihazında (mastersizer) yapılan boyut hesaplamalarında aynı tozların tüm yüzeyi taranmak suretiyle tüm boyut işleme dâhil edilmektedir. Bu yüzden mastersizer’ dan elde edilen eğriler 250 µm boyutunu geçmektedir. Bu durum aynı zamanda toz şekli küresel dışında herhangi bir şekilde olduğunda elek analizinin yetersizliğini de ortaya koymaktadır.

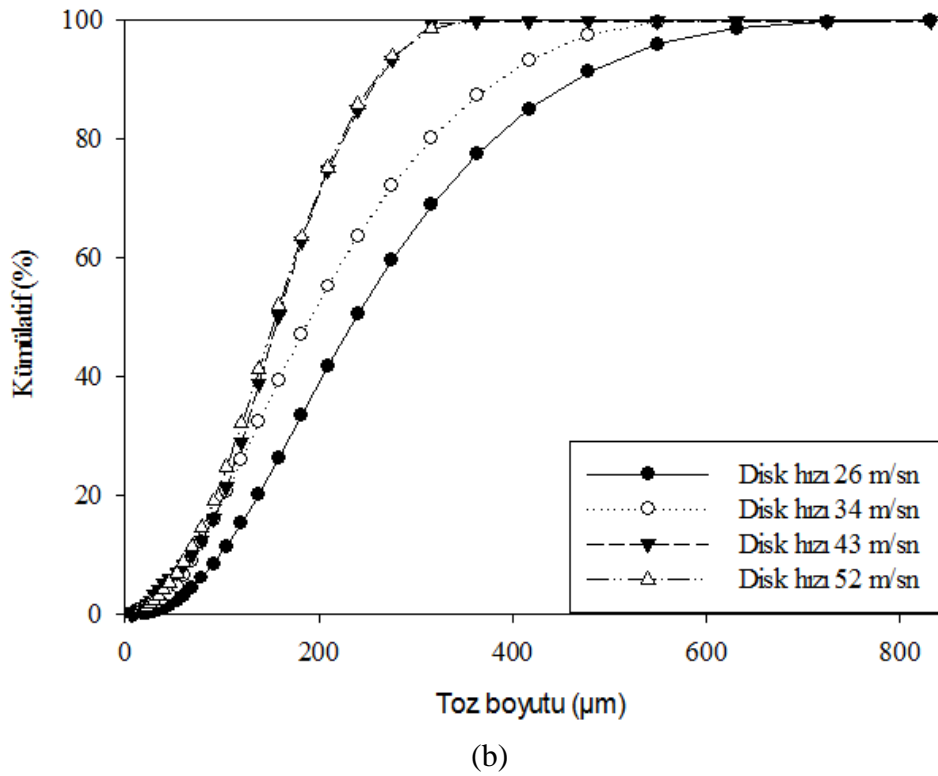
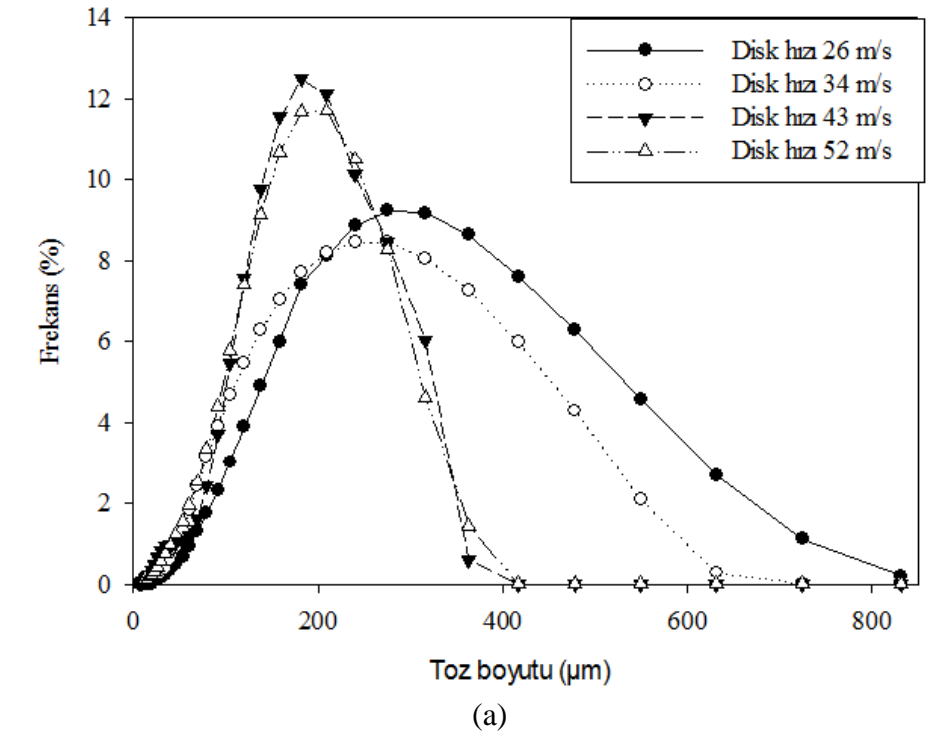
Disk hızının frekans, kümülatif toz boyut dağılımı ve ortalama toz boyutuna etkisi şekil 39-40’ da verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi, artan disk hızı ile boyut dağılımı ve frekans eğrileri sol tarafa, diğer bir ifadeyle ince toz boyutuna doğru kaymaktadır. Artan disk hızı ile ince boyutta toz üretiminin arttığı ve ortalama toz boyutunun azaldığı gözlemlenmiştir. 26, 34, 43 ve 52 m/s disk hızlarında elde edilen ortalama toz boyutu(d_{50}) değerleri sırasıyla 274, 220, 181 ve 177 µm olarak bulunmuştur [128, 129].

Püskürtme basıncının frekans, kümülatif boyut dağılımı ve ortalama toz boyutuna etkisi şekil 41 ve 42’ de verilmiştir. Azalan püskürtme basıncıyla frekans eğrileri ince toz boyutu tarafına, kümülatif dağılım eğrileri de yine sol tarafa doğru kaymaktadır. 0,6, 0,8, 1 ve 1,2 bar püskürtme basınçlarında elde edilen d_{50} değerleri sırasıyla 161, 176, 220 ve 253 µm olarak bulunmuştur.

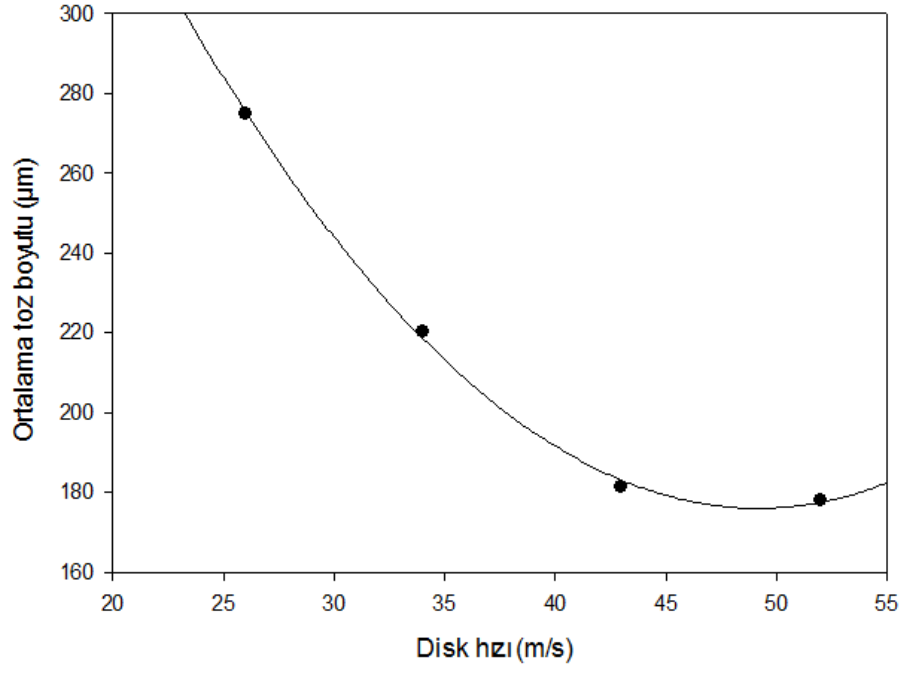
Sıvı metal sıcaklığının frekans, kümülatif boyut dağılımı ve ortalama toz boyutuna etkisi şekil 43 ve 44’ de verilmiştir. Artan sıcaklık ile toz boyut dağılımı azalmış ve eğriler

sola doğru kaymıştır. 750-800, 800-850, 850-900 ve 900-940°C sıcaklık aralıklarında d_{50} değerleri sırasıyla 220, 214, 209 ve 195 μm olarak bulunmuştur.

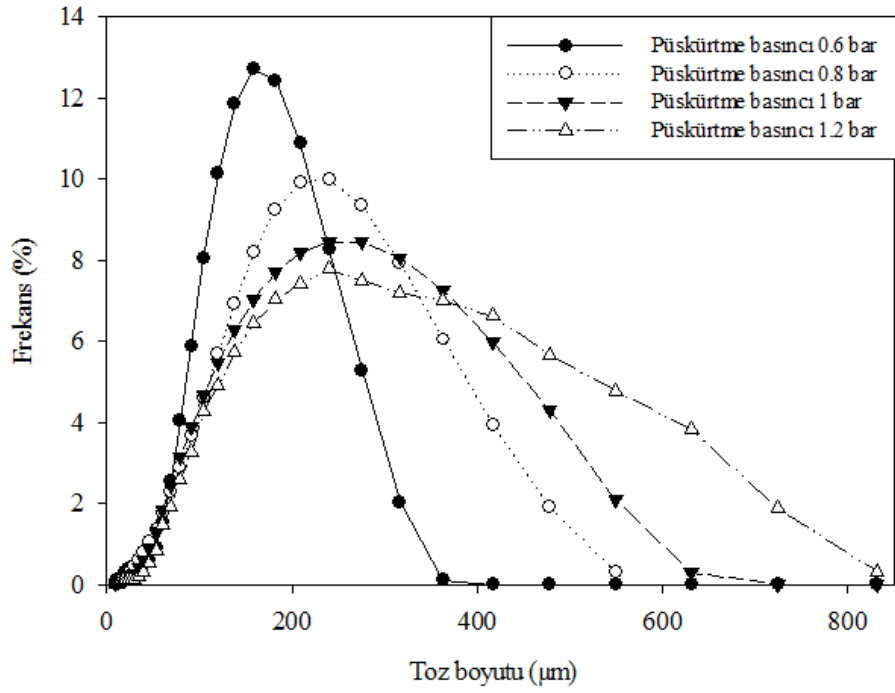
Nozul–disk mesafesinin frekans, kümülatif boyut dağılımı ve ortalama toz boyutuna etkisi şekil 45 ve 46’ da verilmiştir. 0,5, 1, 2 ve 3 mm nozul – disk arası mesafelerde elde edilen d_{50} değerleri sırasıyla 184, 207, 218 ve 223 μm olarak bulunmuştur.



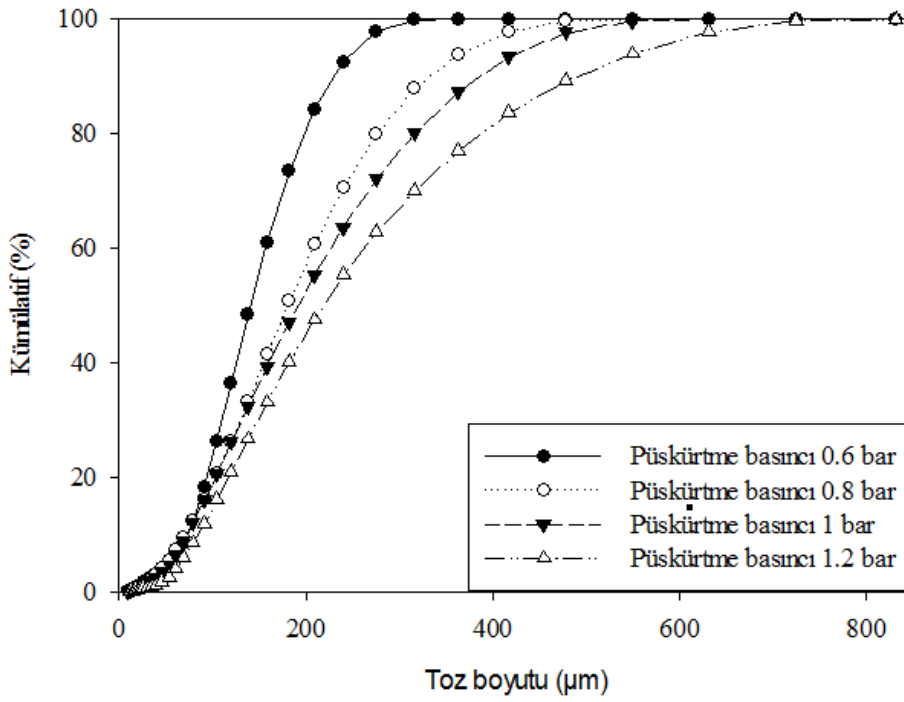
Şekil 39. Melt spinning ile üretilen tozların disk hızının a) frekans, b) kümülatif boyut dağılımına etkisi



Şekil 40. Disk hızının ortalama toz boyutuna etkisi

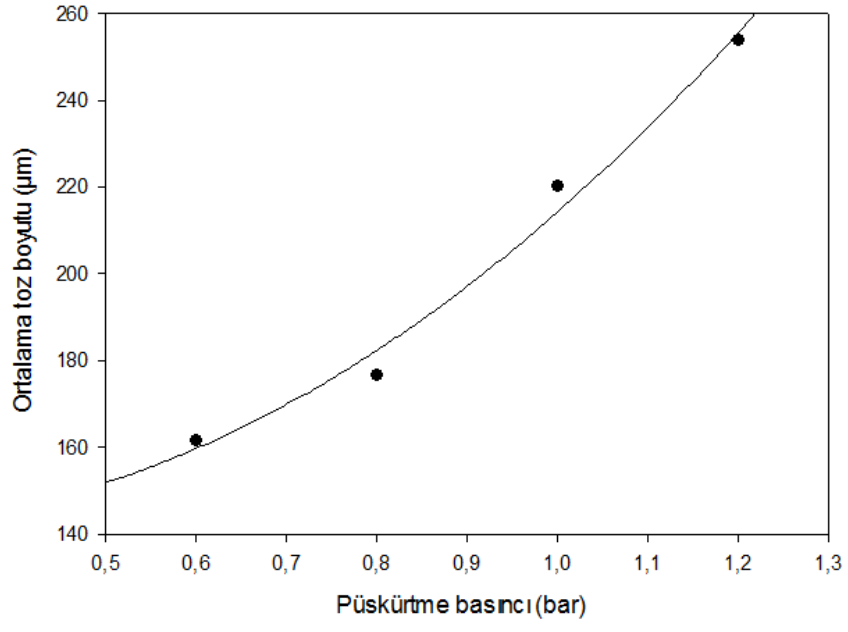


(a)

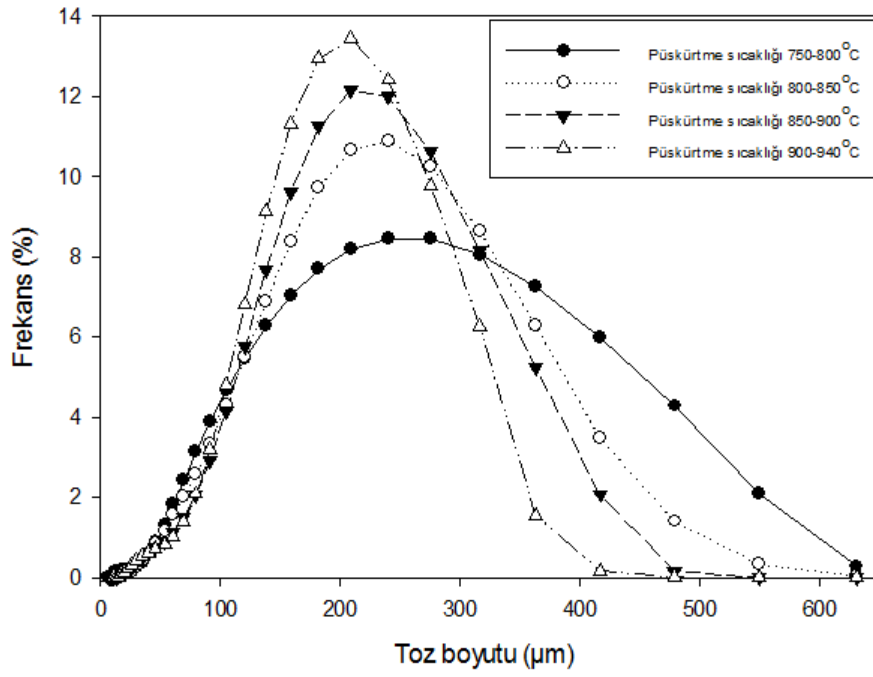


(b)

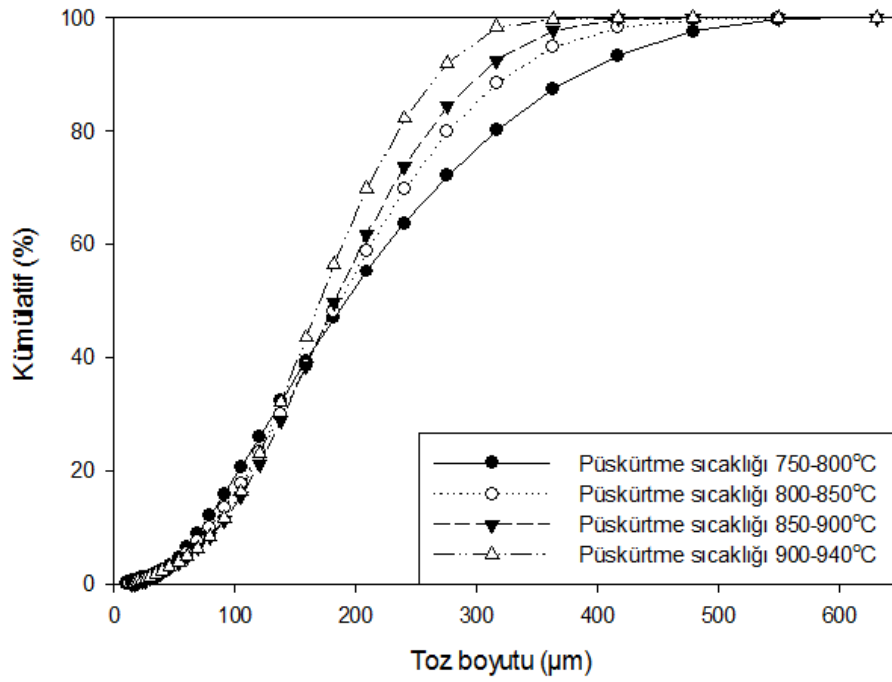
Şekil 41. Melt spinning ile üretilen tozların püskürtme basıncının a) frekans, b) kümülatif boyut dağılımına etkisi



Şekil 42. Püskürtme basıncının ortalama toz boyutuna etkisi

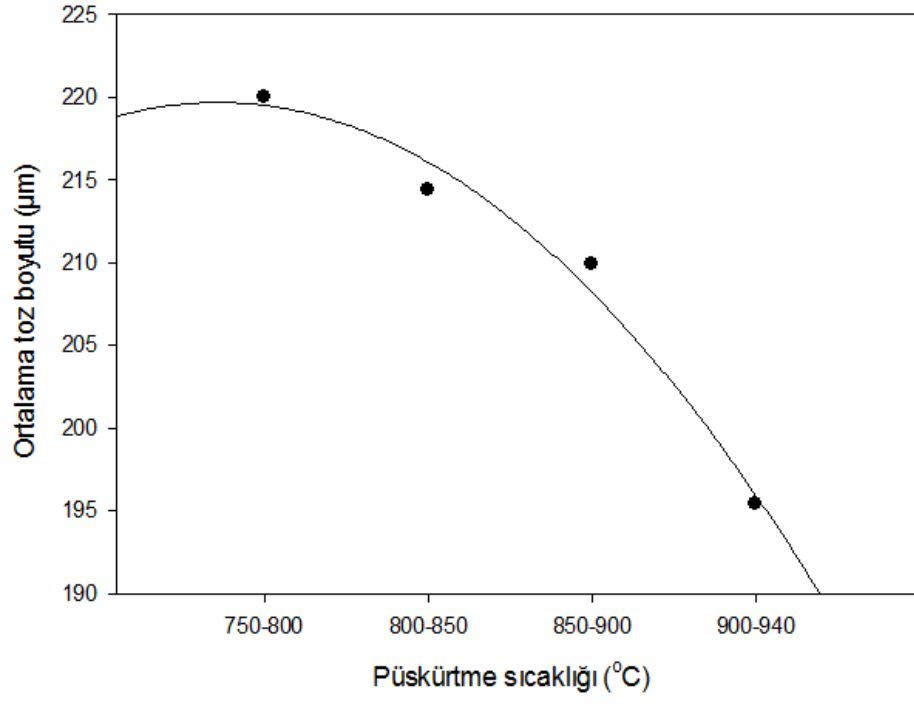


(a)

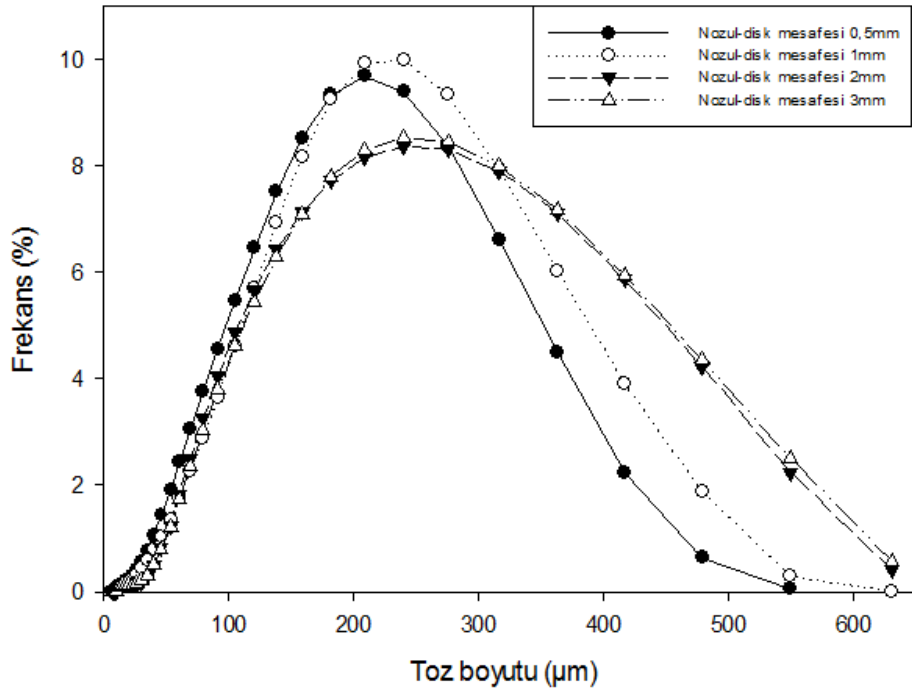


(b)

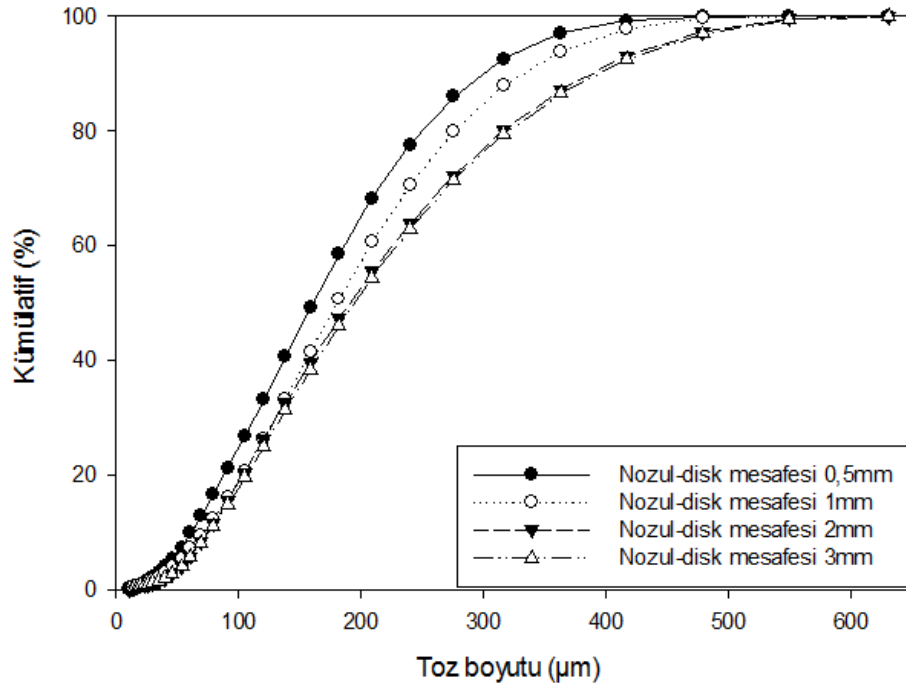
Şekil 43. Melt spinning ile üretilen tozların sıvı metal sıcaklığının a) frekans, b) kümülatif boyut dağılımına etkisi



Şekil 44. Sıvı metal sıcaklığının ortalama toz boyutuna etkisi

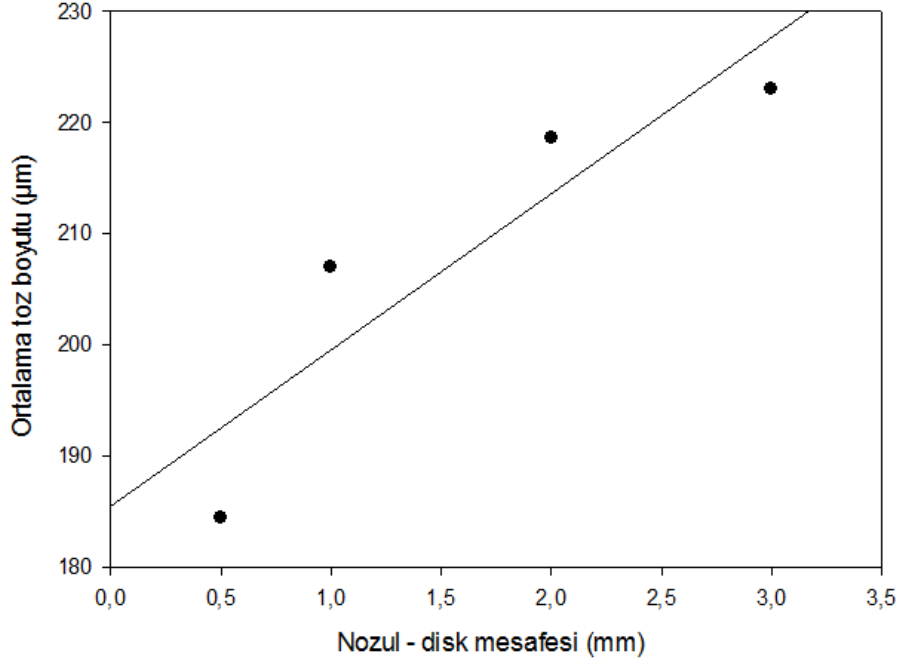


(a)



(b)

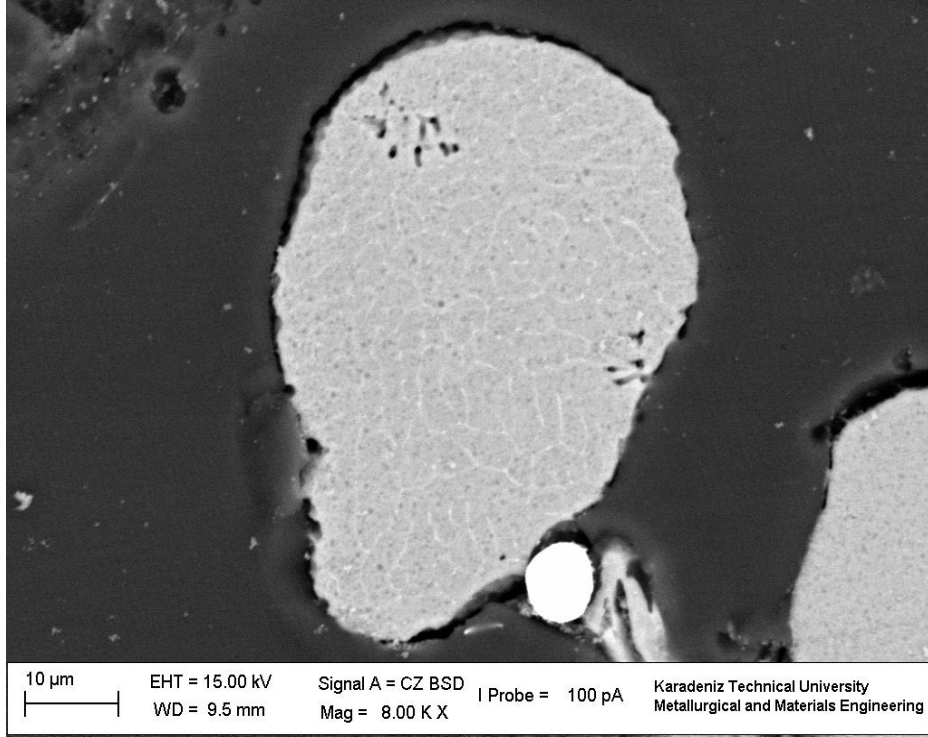
Şekil 45. Melt spinning ile üretilen tozların nozul-disk mesafesinin a) frekans, b) kümülatif boyut dağılımına etkisi



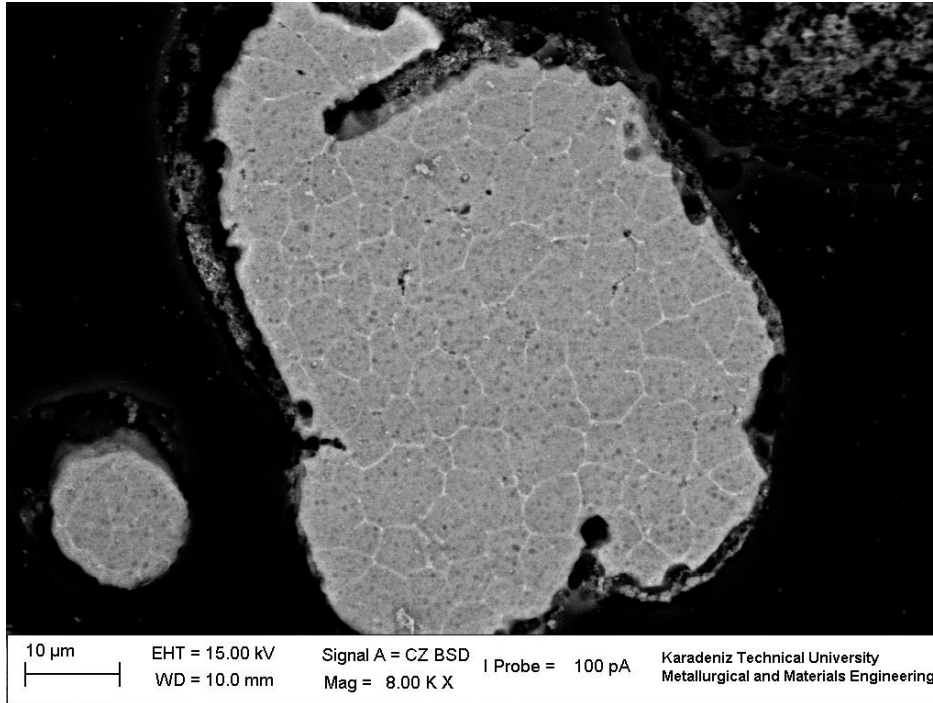
Şekil 46. Nozul - disk mesafesinin ortalama toz boyutuna etkisi

3.5. Üretilen Tozların Mikroyapıları

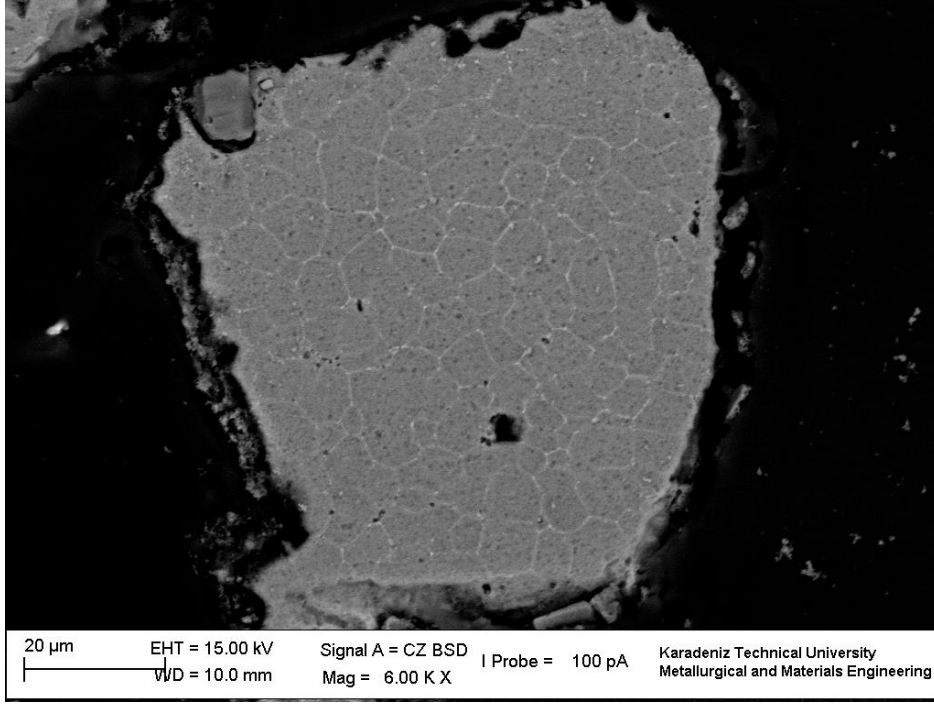
Şekil 47 – 56’ da üretilen AA6060 alüminyum alaşımı tozları mikroyapı fotoğrafları 46, 57, 72, 85, 98, 115, 127, 142, 161 ve 193 µm boyutlarındaki tozlar için verilmiştir. Şekillerden de anlaşıldığı gibi, toz boyutu arttıkça tane boyutları da artmaktadır. Mikroyapının genellikle eşeksenli olduğu ve toz boyutunun büyümesiyle tane boyutunun da bir miktar büyüdüğü gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda yine 6000 serisi alüminyum alaşımları için verilmiş olan (5) nolu eşitlik kullanılarak tane boyutuna bağlı soğuma hızları hesaplanmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda 46, 57, 72, 85, 98, 115, 127, 142, 161 ve 193 µm boyutlarındaki tozlar için, ortalama tane boyutları sırasıyla 4,8, 5,2, 5,8, 6, 6,3, 6,8, 7, 7,6, 7,9 ve 8,3 µm olarak hesaplanmıştır. Soğuma hızları ise, $6,44 \times 10^2$, $5,24 \times 10^2$, $3,97 \times 10^2$, $3,64 \times 10^2$, $3,21 \times 10^2$, $2,64 \times 10^2$, $2,45 \times 10^2$, $1,99 \times 10^2$, $1,80 \times 10^2$ ve $1,58 \times 10^2$ K/s olarak bulunmuştur. Toz boyutuna bağlı tane boyutu ve soğuma hızları Tablo 6 ve şekil 57-59’ da verilmiştir.



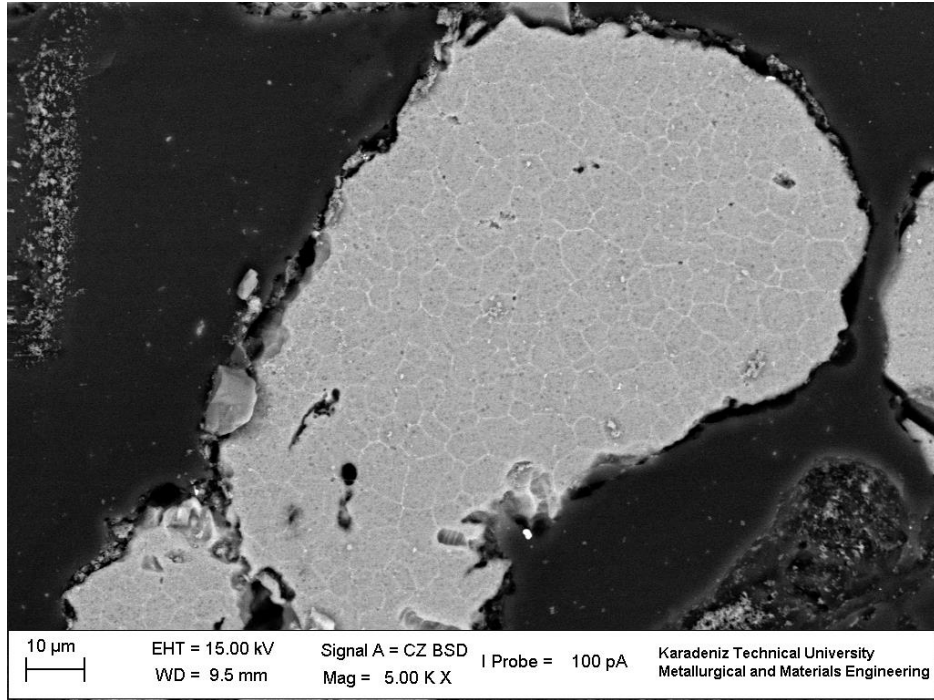
Şekil 47. AA6060 tozu mikroyapısı (46 μm)



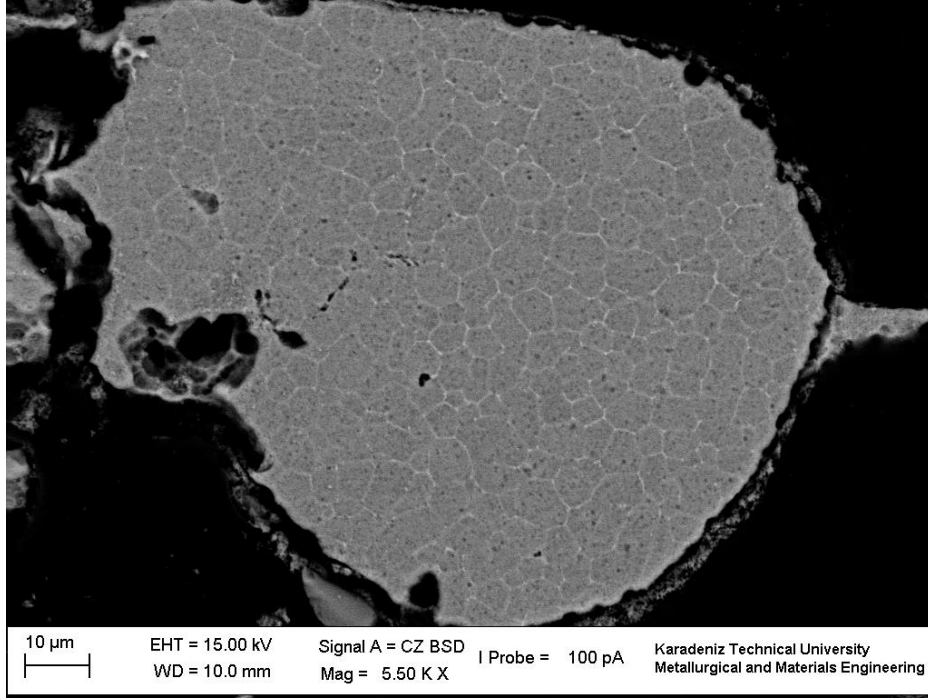
Şekil 48. AA6060 tozu mikroyapısı (57 μm)



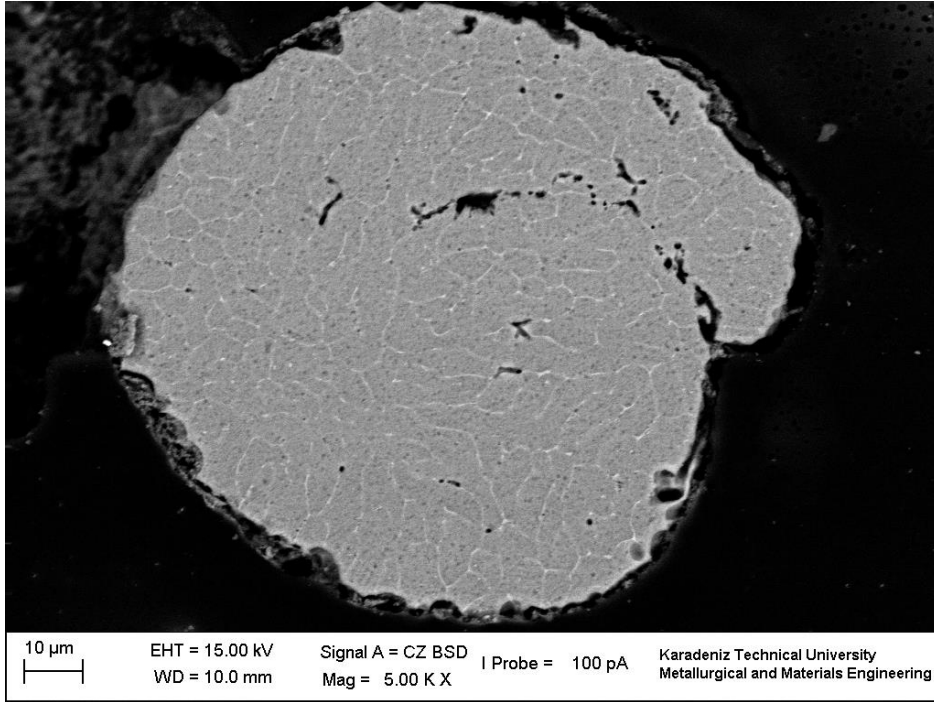
Şekil 49. AA6060 tozu mikroyapısı (72 μm)



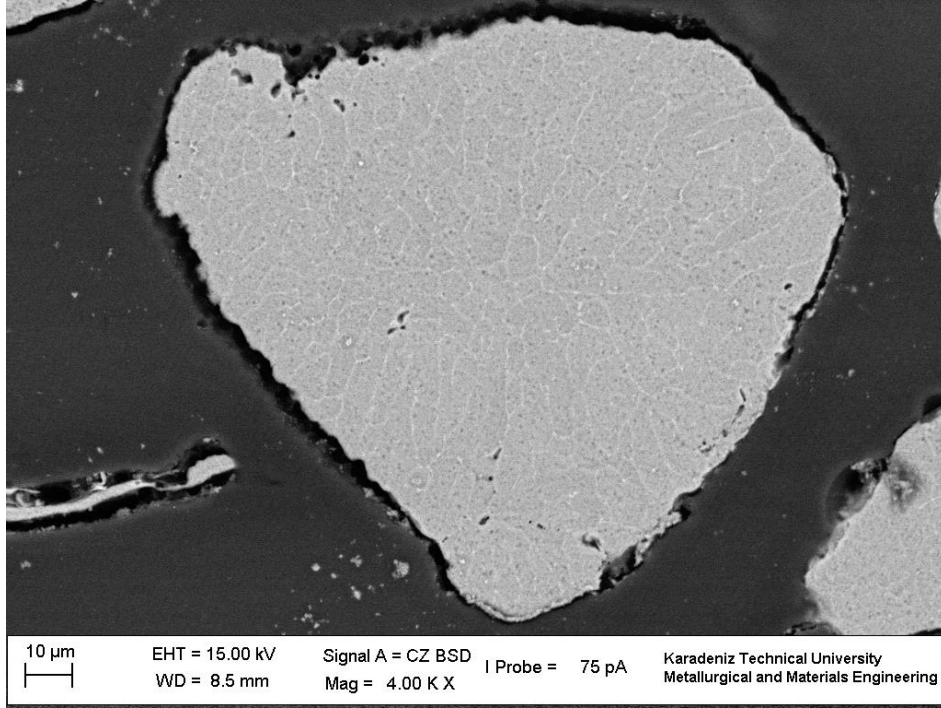
Şekil 50. AA6060 tozu mikroyapısı (85 μm)



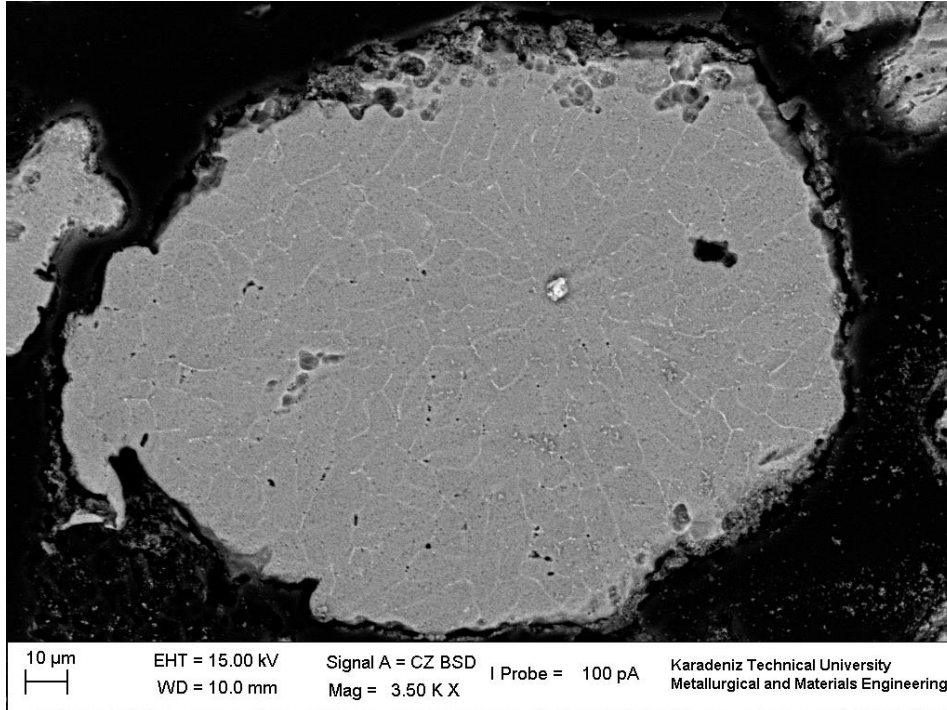
Şekil 51. AA6060 tozu mikroyapısı (98 μm)



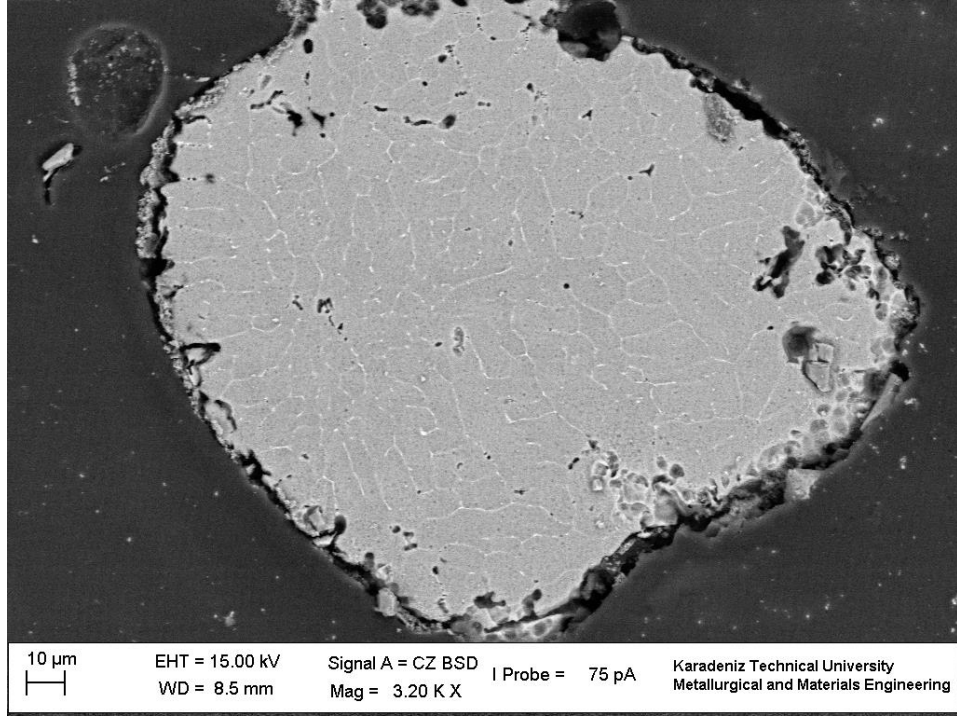
Şekil 52. AA6060 tozu mikroyapısı (115 μm)



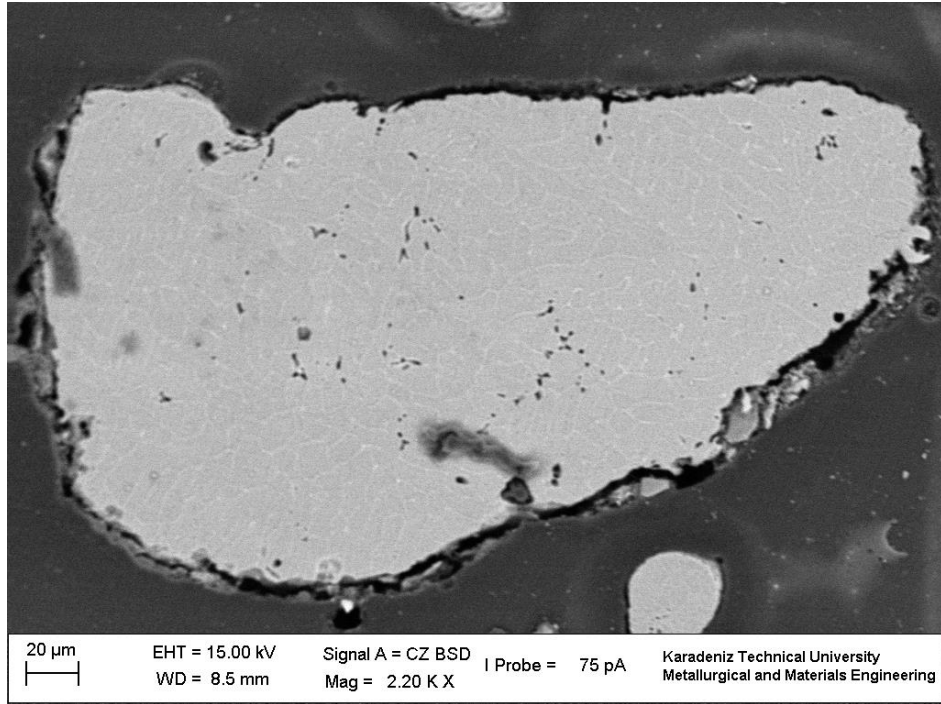
Şekil 53. AA6060 tozu mikroyapısı (127 μm)



Şekil 54. AA6060 tozu mikroyapısı (142 μm)



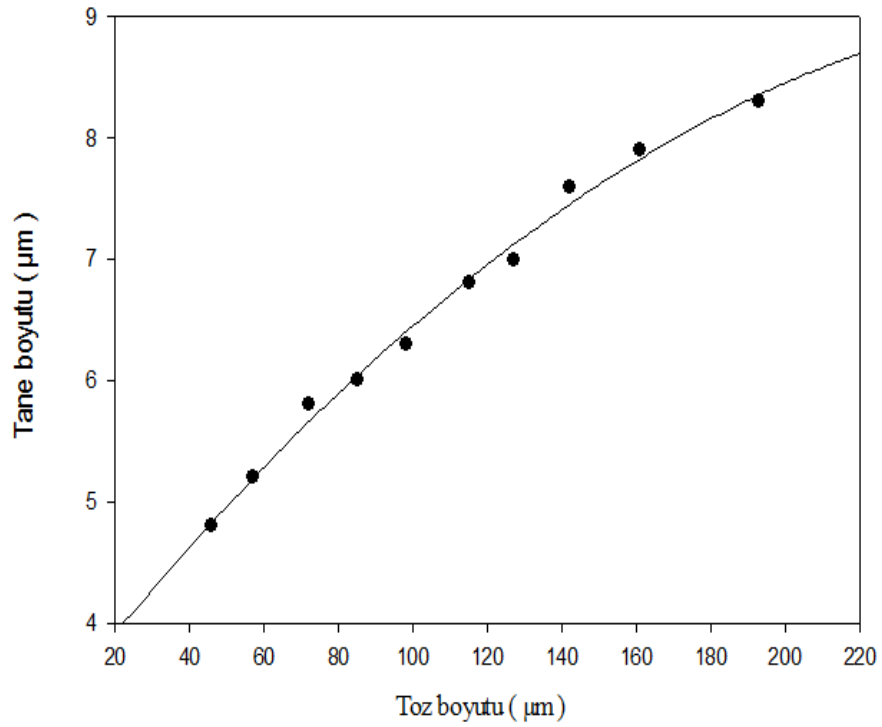
Şekil 55. AA6060 tozu mikroyapısı(161 μm)



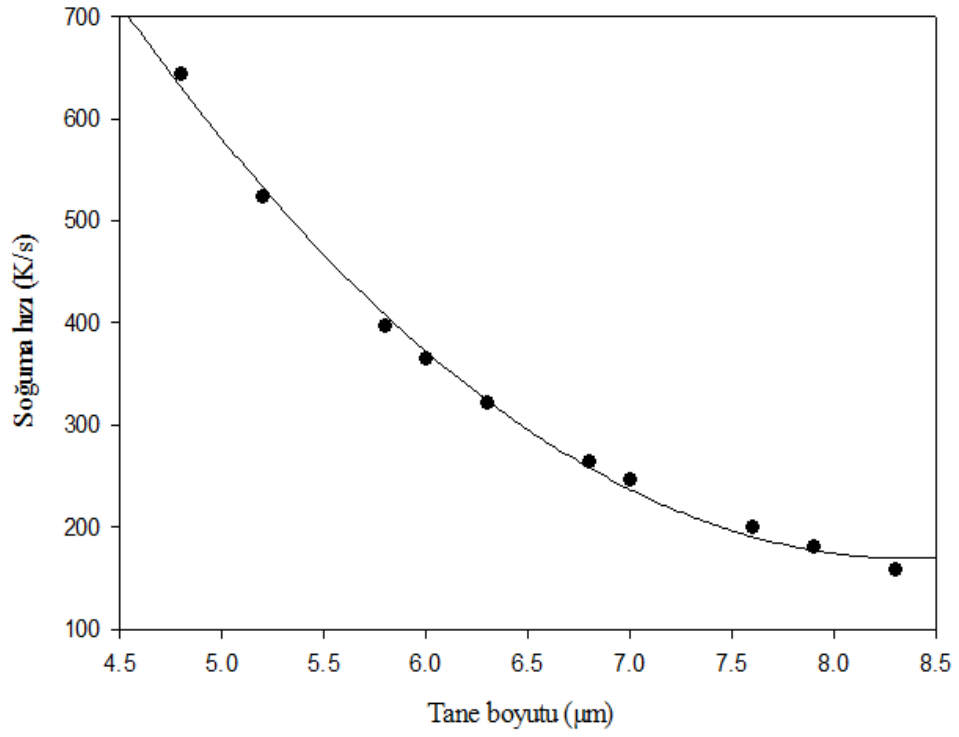
Şekil 56. AA6060 tozu mikroyapısı (193 μm)

Tablo 6. AA6060 tozlarında toz boyutlarına bağlı olarak tane boyutu ve soğuma hızı değişimi

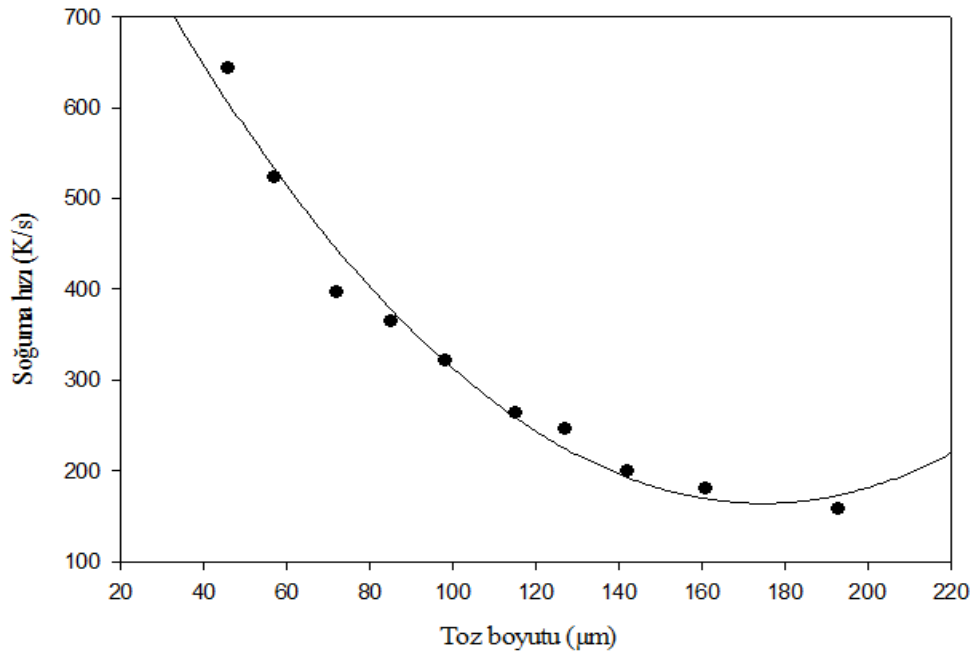
Toz boyutu (μm)	Tane boyutu (μm)	Soğuma hızı (K/s)
46	4,8	$6,44 \times 10^2$
57	5,2	$5,24 \times 10^2$
72	5,8	$3,97 \times 10^2$
85	6	$3,64 \times 10^2$
98	6,3	$3,21 \times 10^2$
115	6,8	$2,64 \times 10^2$
127	7	$2,45 \times 10^2$
142	7,6	$1,99 \times 10^2$
161	7,9	$1,80 \times 10^2$
193	8,3	$1,58 \times 10^2$



Şekil 57. AA6060 tozlarında toz boyutuna bağlı olarak tane boyutu değişimi



Şekil 58. AA6060 tozlarında tane boyutuna bağlı soğuma hızı değişimi



Şekil 59. AA6060 tozlarında toz boyutuna bağlı soğuma hızı değişimi

4. SONUÇLAR

Yapılan deneylerden ve elde edilen bulguların değerlendirilmesinden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

1. Üretilen şeritlerden en düşük ortalama kalınlığa sıvı metal sıcaklığı 850 °C' de ulaşılmıştır.
2. 26, 38, 46 ve 52 m/s şeklinde artan disk hızıyla ortalama şerit kalınlıkları sırasıyla 119, 87, 80 ve 60 µm olarak azaldığı tespit edilmiştir.
3. Ortalama şerit kalınlığı, 0,6 bar'dan 1,2 bar'a artan püskürtme basıncıyla 56 µm'den 92 µm'ye artmıştır.
4. 700, 750, 800 ve 850 °C püskürtme sıcaklıklarında yapılan deneylerde ortalama şerit kalınlıkları sırasıyla 93, 87, 62 ve 55 µm olarak elde edilmiştir.
5. 2'den 4 mm'ye kadar artan nozul – disk mesafesiyle ortalama şerit kalınlığında büyük bir değişim gözlenmemiş, fakat 5 mm nozul – disk mesafesiyle ortalama şerit kalınlığının arttığı gözlemlenmiştir.
6. Azalan nozul genişliğiyle ortalama şerit kalınlığı azalmıştır.
7. Şeritlerin mikroyapıları eşeksenli olarak elde edilmiştir. Azalan şerit kalınlığı ile ortalama tane boyutu azalmış ve soğuma hızı artmıştır. 92 - 30 µm' ye azalan şerit kalınlıklarında, ortalama tane boyutu 4,1 – 1,7 µm' ye azalmış ve 4,1 – 1,7 µm ortalama tane boyutlarında, soğuma hızları $0,96 \times 10^3$ K/s – $9,20 \times 10^3$ K/s' ye artmıştır.
8. Melt spinning sisteminde dokulu disk ile üretilen AA6060 tozları genellikle şerit, çubuksu, puls, yapraksı ve düzensiz şekilde olup ve toz şekli parçacık boyutuna bağlı olarak değişmemiştir.
9. Disk hızı, püskürtme basıncı, sıvı metal sıcaklığı ve nozul – disk mesafesi gibi melt spinning parametrelerinin toz şeklini etkilemediği tespit edilmiştir.
10. Melt spinning parametrelerinin ortalama toz boyutunda küçük farklılıklar oluşturduğu gözlemlenmiştir.
11. En düşük ortalama boyutta tozlar 0,6 bar püskürtme basıncında elde edilmiştir.
12. Üretilen tozların mikroyapılarında genellikle eşeksenli olup, toz boyutunun büyümesiyle tane boyutu da büyümüştür.

13. Üretilen tozların tane boyutu, toz boyutuna bağlı olarak 1,9 – 3,9 μm arasında değişmiştir. Tane boyutlarına bağlı olarak soğuma hızları $6,90 \times 10^3$ - $1,10 \times 10^3$ K/s arasında değişmiştir.

5. ÖNERİLER

1. Konik uçlu nozul kullanılabilir.
2. Soğutma sistemli disk ile daha yüksek soğutma hızlarına ulaşılabilir.

6. KAYNAKLAR

1. Suryanarayana, C., Froes, F.H. ve Rowe, R.G., Rapid solidification processing of titanium alloys, International Materials Reviews, 36,1 (1991) 85-123.
2. El-Eskandarany, M.S., Mechanical Alloying - Nanotechnology, Materials Science and Powder Metallurgy (2nd Edition), 1. Introduction, Elsevier, 2015.
3. Sarıtaş, S., Türker, M. ve Durlu, N., Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri, 2007.
4. Neikov, O.D., Naboychenko, S.S., Murashova, I.V., Gopienko, V.G., Frishberg, I.V. ve Lotsko, D.V., Handbook of Non-Ferrous Metal Powders - Technologies and Applications, Section 2. Powder Production Methods, Elsevier, 47-62, 2009.
5. Klement, W., Willens, R.H. ve Duwez, P.O.L., Non-crystalline Structure in Solidified Gold-Silicon Alloys, Nature, 187,4740 (1960) 869-870.
6. Sudarshan, T.S. ve Srivatsan, T.S., Rapid Solidification Technology: An Engineering Guide, Technomic Publishing Company, 1993.
7. Chen, Z.-w., Tang, M.-j., Li, S.-s. ve Feng, Z.-q., Abnormal precipitation behavior in T6 melt-spun AlMgCu ribbon, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 24,1 (2014) 22-27.
8. Dehghani, K., Salehi, M., Salehi, M. ve Aboutalebi, H., Comparing the melt-spun nanostructured aluminum 6061 foils with conventional direct chill ingot, Materials Science and Engineering: A, 489,1-2 (2008) 245-252.
9. Dong, X., He, L. ve Li, P., Gradient microstructure and multiple mechanical properties of AlSi9Cu alloy ribbon produced by melt spinning, Journal of Alloys and Compounds, 612 (2014) 20-25.
10. Karaköse, E. ve Keskin, M., Structural investigations of mechanical properties of Al based rapidly solidified alloys, Materials & Design, 32,10 (2011) 4970-4979.
11. Katgerman, L. ve Dom, F., Rapidly solidified aluminium alloys by meltspinning, Materials Science and Engineering: A, 375-377 (2004) 1212-1216.
12. Öveçoğlu, M.L., Ünlü, N., Eruslu, N. ve Genç, A., Characterization investigations of a melt-spun ternary Al-8Si-5.1Cu (in wt.%) alloy, Materials Letters, 57,21 (2003) 3296-3301.
13. Jacobson, L.A., McKittrick, Joanna Rapid solidification processing, Materials Science and Engineering, R11 (1994) 355-408.

14. Mendenhall, C.E. ve Ingersoll, L.R., XVII. On certain phenomena exhibited by small particles on a Nernst glower, Philosophical Magazine Series 6, 15,86 (1908) 205-214.
15. Strange E. H., P.C.A., Process of manufacturing thin sheets, foil, strips, or ribbons of zinc, lead, or other metal or alloy. 421055 (1908).
16. Duwez, P. ve Willens, R.H., Rapid quenching of liquid alloys, Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 227 (1963) 362-365.
17. Duwez, P., Willens, R.H. ve Crewdson, R.C., Amorphous Phase in Palladium—Silicon Alloys, Journal of Applied Physics, 36,7 (1965) 2267.
18. Duwez, P., Glassy Metals I, Metallic glasses-historical background, 2, H.-J. Güntherodt and H. Beck editors, 46, Springer Berlin Heidelberg, 19-23, 1981.
19. Kamal, M. ve Mohammad, U.S., Review : Chill-Block Melt Spin Technique : Theories and Application, Rapid Solidification Processing, 1, Bentham Science Publishers, Sharjah, UAE, 3-41, 2012.
20. Pietrokowsky, P., Novel Mechanical Device for Producing Rapidly Cooled Metals and Alloys of Uniform Thickness, Review of Scientific Instruments, 34,4 (1963) 445-446.
21. Cahn, R.W., Krishnanand, K.D., Laridjani, M., Greenholz, M. ve Hill, R., Novel splat-quenching techniques and methods for assessing their performance, Materials Science and Engineering, 23,2-3 (1976) 83-86.
22. Predecki, P., Mullendore, A.W. ve Grant, N.J., A Study of the Splat Cooling Technique, Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 233 (1965) 1581.
23. Harbur, D.R., Anderson, J.W. ve Maraman, W.J., Rapid Quenching Drop Smasher, Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 245 (1969) 1055.
24. Pond, R.B., Metallic filaments and method of making same. (1958).
25. Pond, R.B., Apparatus for producing metal filaments. (1959).
26. Pond, R.B., Method of producing continuous metallic filaments. (1961).
27. Pond, R.B., Maddin, R. ve Maddin, J., A Method of Producing Rapidly Solidified Filamentary Castings, Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 245 (1969) 2475.
28. Lakshmikumar, S.T., Mallya, R.M. ve Gopal, E.S.R., Development of a roller quenching apparatus for the production of amorphous phases, Bulletin of Materials Science, 2,4 (1980) 233-237.

29. Lavernia, E.J., Ayers, J.D. ve Srivatsan, T.S., Rapid solidification processing with specific application to aluminium alloys, International Materials Reviews, 37,1 (1992) 1-44.
30. Lavernia, E.J. ve Srivatsan, T.S., The rapid solidification processing of materials: science, principles, technology, advances, and applications, Journal of Materials Science, 45,2 (2009) 287-325.
31. Jones, H., Pergamon Materials Series, Chapter 3 Rapid solidification, C. Suryanarayana editor, Volume 2, Pergamon, 23-45, 1999.
32. Ahmed, E.M., The influence of rapid solidification on the microstructure properties of Al-10Ni-10Ce alloy, The European Physical Journal Plus, 127,6 (2012).
33. Chen, H.S., Glassy metals, Reports on Progress in Physics, 43,4 (1980) 353.
34. Ishida, M., Takeda, H., Watanabe, D., Amiya, K., Nishiyama, N., Kita, K., Saotome, Y. ve Inoue, A., Fillability and Imprintability of High-strength Ni-based Bulk Metallic Glass Prepared by the Precision Die-casting Technique, MATERIALS TRANSACTIONS, 45,4 (2004) 1239-1244.
35. Jones, H., Microstructure of rapidly solidified materials, Materials Science and Engineering, 65,1 (1984) 145-156.
36. Karaköse, E. ve Keskin, M., Microstructure properties and microhardness of rapidly solidified Al₆₄Cu₂₀Fe₁₂Si₄ quasicrystal alloy, Metals and Materials International, 18,2 (2012) 257-263.
37. Lee, S., Masood, A., Tamaki, T., Valter, S., Rao, K.V., Makino, A. ve Inoue, A., Magneto-thermo-gravimetric technique to investigate the structural and magnetic properties of Fe-B-Nb-Y Bulk Metallic Glass, Journal of Physics: Conference Series, 144 (2009) 012074.
38. Nussbaum, G., Deweirder, D. ve Gjestland, H.T., Rapidly solidified and worked high strength magnesium alloy containing strontium. (1992).
39. Zhang, Z., Wang, Y., Bian, X. ve Wang, W., Orientation of nanocrystals in rapidly solidified Al-based alloys and its correlation to the compound-forming tendency of alloys, Journal of Crystal Growth, 281,2-4 (2005) 646-653.
40. Mehrabian, R., Rapid solidification, International Materials Reviews, 27,1 (1982) 185-208.
41. Öztürk, S., Öztürk, B., Erdemir, F. ve Usta, G., Production of rapidly solidified Cu-Sn ribbons by water jet cooled rotating disc method, Journal of Materials Processing Technology, 211,11 (2011) 1817-1823.
42. Zhang, X. ve Atrens, A., Rapid solidification characteristics in melt spinning, Materials Science and Engineering: A, 159,2 (1992) 243-251.

43. Jones, H., Rapid solidification of metals and alloys, Monograph No.8, The Institution of Metallurgists, A 5, 1982.
44. Savage, S.J. ve Froes, F.H., Production of Rapidly Solidified Metals and Alloys, JOM, 36,4 (1984) 20-33.
45. Kamal, M. ve Mohammad, U.S., Review : Chill-Block Melt Spin Technique : Theories and Application, Chill-Block Melt Spin Technique, 2, Bentham Science Publishers, Sharjah, UAE, 42-69, 2012.
46. Gündeş, A., Al-Ni-Si Alaşımlarının Hızlı Katılaştırma ile Üretilmesi ve Fiziksel, Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002.
47. Chen, Z., Lei, Y. ve Zhang, H., Structure and properties of nanostructured A357 alloy produced by melt spinning compared with direct chill ingot, Journal of Alloys and Compounds, 509,27 (2011) 7473-7477.
48. Jassim, A.K. ve Hammood, A.S., Sustainable Manufacturing Process for Bulk Metallic Glasses Production Using Rapid Solidification with Melt Spinning Technique, International Conference on Material Science and Material Engineering(MSME 2014), 2014.
49. Karaköse, E. ve Keskin, M., Investigation of microstructural, mechanical and thermal properties of rapidly solidified Ni-7 wt% Si alloy, Materials Science and Engineering: A, 553 (2012) 181-191.
50. Urata, A., Nishiyama, N., Amiya, K. ve Inoue, A., Continuous casting of thick Fe-base glassy plates by twin-roller melt-spinning, Materials Science and Engineering: A, 449-451 (2007) 269-272.
51. Ibrahim, T.K. ve Humod, A.S., Rapid Solidification Processing of Al- 3wt% Mg Alloy, Eng. & Tech., 25,10 (2007) 1102-1109.
52. Zhang, L.C. ve Xu, J., Glass-forming ability of melt-spun multicomponent (Ti, Zr, Hf)-(Cu, Ni, Co)-Al alloys with equiatomic substitution, Journal of Non-Crystalline Solids, 347,1-3 (2004) 166-172.
53. Lanotte, L., Ausanio, G., Iannotti, V., Branda, F., Luciani, G., Stantero, A., Vinai, F. ve Carbucicchio, M., Metastability in Fe_{62.5}Co₆Ni_{7.5}Zr₆Nb₂Cu₁B₁₅ amorphous alloy and optimisation of its magnetoelastic response, Nanostructured Materials, 11,6 (1999) 805-811.
54. Choi, H.-j., Kim, J.-h., Noh, J.-p., Miyazaki, S., Kim, Y.-w. ve Nam, T.-h., Crystallization behavior and microstructure of Ti-36Ni-7Sn (at.%) alloy ribbons, Scripta Materialia, 65,7 (2011) 611-614.

55. Kang, S.-w., Lee, Y.-h., Lim, Y.-m., Nam, J.-m., Nam, T.-h. ve Kim, Y.-w., Relationship between grain size and martensitic transformation start temperature in a Ti-30Ni-20Cu alloy ribbon, Scripta Materialia, 59,11 (2008) 1186-1189.
56. Hou, X., Hu, R., Zhang, T., Kou, H., Song, W. ve Li, J., Microstructure and electrochemical hydrogenation/dehydrogenation performance of melt-spun La-doped Mg₂Ni alloys, Materials Characterization, 106 (2015) 163-174.
57. UZUN, O., KARAASLAN, T. ve KESKIN, M., Production and Structure of Rapidly Solidified Al-Si Alloys, Turk J Phys, 25 (2001) 455-466.
58. Jang, B.Y., Soo Kim, J. ve Soo Ahn, Y., Induction melting process using segmented graphite crucible for silicon melting, Solar Energy Materials and Solar Cells, 95,1 (2011) 101-106.
59. Emrulloğlu, Ö.F., Emrulloğlu, C.B. ve Günaydın, S., Bor nitrür üretimi, 1. Uluslararası Bor Sempozyumu, 2002, Kütahya Dumlupınar 124-128.
60. Angın, M.H. ve Aydın, S., Bor Nitrür Ön Fizibilite Etüdü 2003, Eti Holding A.Ş. Genel Müdürlüğü, Planlama ve Bilgi İşlem Dairesi Başkanlığı, Ankara.
61. URL-1, <http://www.microsi.com/cruciblesandotherproducts%20.aspx> 28.06.2015 - 16:30.
62. Zhou, C., Tessema, M., Meyer, M.S. ve Pinkerton, F.E., Synthesis of CeFe_{10.5}Mo_{1.5} with ThMn₁₂-type structure by melt spinning, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 336 (2013) 26-28.
63. Hütten, A., Bernardi, J., Friedrichs, S., Thomas, G. ve Balcells, L., Microstructural influence on magnetic properties and giant magnetoresistance of melt-spun gold-cobalt, Scripta Metallurgica et Materialia, 33,10-11 (1995) 1647-1666.
64. Namkung, J., Kim, M.C. ve Park, C.G., Magnetic properties of melt quenched Ni-Fe alloy strips, Materials Science and Engineering: A, 375-377 (2004) 1116-1120.
65. Kalinichenka, S., Röntzsch, L., Riedl, T., Weißgärber, T. ve Kieback, B., Hydrogen storage properties and microstructure of melt-spun Mg₉₀Ni₈RE₂ (RE = Y, Nd, Gd), International Journal of Hydrogen Energy, 36,17 (2011) 10808-10815.
66. Theisen, E.A., Davis, M.J., Weinstein, S.J. ve Steen, P.H., Transient behavior of the planar-flow melt spinning process, Chemical Engineering Science, 65,10 (2010) 3249-3259.
67. Napolitano, R.E. ve Meco, H., The role of melt pool behavior in free-jet melt spinning, Metallurgical and Materials Transactions A, 35,5 (2004) 1539-1553.
68. Calvo-Dahlborg, M., Structure and embrittlement of metallic glasses, Materials Science and Engineering: A, 226-228 (1997) 833-845.

69. Ahmad, I., Davies, H.A. ve Buckley, R.A., The effect of Nd content on the structure and properties of melt spun Nd-rich NdFeB alloys, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 157–158 (1996) 31-32.
70. Yang, S., Liu, X.S., Li, S.D., Xie, G.Z., Song, X.P., Gu, B.X. ve Du, Y.W., Effect of wheel speed on the microstructure and exchange coupling interaction of nanocomposite Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe magnets, Materials Science and Engineering: A, 347,1–2 (2003) 325-329.
71. Chen, Z., Zhang, Y., Hadjipanayis, G.C., Chen, Q. ve Ma, B., Effect of wheel speed and subsequent annealing on the microstructure and magnetic properties of nanocomposite Pr₂Fe₁₄B/ α -Fe magnets, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 206,1–2 (1999) 8-16.
72. Billoni, O.V., Urreta, S.E., Fabietti, L.M. ve Bertorello, H.R., Dependence of the coercivity on the grain size in a FeNdB+ α Fe nanocrystalline composite with enhanced remanence, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 187,3 (1998) 371-380.
73. Arvindha Babu, D., Srivastava, A.P., Majumdar, B., Srivastava, D. ve Akhtar, D., Influence of Melt-Spinning Parameters on the Structure and Soft Magnetic Properties of (Fe_{0.65}Co_{0.35})₈₈Zr₇B₄Cu₁ Alloy, Metallurgical and Materials Transactions A, 41,5 (2010) 1313-1320.
74. Hattel, J.H. ve Pryds, N.H., On the Lack of Dependence of Extent of Columnar Growth on Wheel Speed for Melt-Spun 12Cr-Mo-V Steel, Scripta Materialia, 38,5 (1998) 723-727.
75. Sun, J.-B., Han, D., Cui, C.-X., Yang, W., Li, L. ve Yang, F., Effects of quenching speeds on microstructure and magnetic properties of novel SmCo_{6.9}Hf_{0.1}(CNTs)_{0.05} melt-spun ribbons, Acta Materialia, 57,9 (2009) 2845-2850.
76. Kramer, M.J., Mecco, H., Dennis, K.W., Vargonova, E., McCallum, R.W. ve Napolitano, R.E., Rapid solidification and metallic glass formation – Experimental and theoretical limits, Journal of Non-Crystalline Solids, 353,32–40 (2007) 3633-3639.
77. Vedat Akdeniz, M. ve Wood, J.V., Effect of melt superheat on the geometry of melt spun pure zinc ribbon, Scripta Metallurgica et Materialia, 32,9 (1995) 1471-1475.
78. Srinivas, M., Majumdar, B., Akhtar, D., Srivastava, A.P. ve Srivastava, D., Influence of wheel speed during planar flow melt spinning on the microstructure and soft magnetic properties of Fe_{68.5}Si_{18.5}B₉Nb₃Cu₁ ribbons, Journal of Materials Science, 46,3 (2011) 616-622.

79. Chaklanobis, S. ve Agrawal, D.C., Effect of process parameters on the dimensions of ribbons melt spun using slotted nozzles, Journal of Materials Science Letters, 5,1 (1986) 10-12.
80. Tkatch, V.I., Limanovskii, A.I., Denisenko, S.N. ve Rassolov, S.G., The effect of the melt-spinning processing parameters on the rate of cooling, Materials Science and Engineering: A, 323,1–2 (2002) 91-96.
81. Sohrabi, S., Arabi, H., Beitollahi, A. ve Gholamipour, R., Planar Flow Casting of Fe₇₁Si_{13.5}B₉Nb₃Cu₁Al_{1.5}Ge₁ Ribbons, Journal of Materials Engineering and Performance, (2013).
82. Srinivas, M., Majumdar, B., Phanikumar, G. ve Akhtar, D., Effect of Planar Flow Melt Spinning Parameters on Ribbon Formation in Soft Magnetic Fe_{68.5}Si_{18.5}B₉Nb₃Cu₁ Alloy, Metallurgical and Materials Transactions B, 42,2 (2011) 370-379.
83. Liebermann, H.H. ve Graham, C.D., Production of amorphous alloy ribbons and effects of apparatus parameters on ribbon dimensions, Magnetics, IEEE Transactions on, 12,6 (1976) 921-923.
84. Takayama, S. ve Oi, T., The analysis of casting conditions of amorphous alloys, Journal of Applied Physics, 50,7 (1979) 4962.
85. Taha, M.A., El-Mahallawy, N.A. ve Abdel-Gaffar, M.F., Geometry of melt-spun ribbons, Materials Science and Engineering: A, 134 (1991) 1162-1165.
86. Kim, Y.-W. ve Nam, T.-H., The effect of the melt spinning processing parameters on the martensitic transformation in Ti₅₀-Ni₃₅-Cu₁₅ shape memory alloys, Scripta Materialia, 51,7 (2004) 653-657.
87. Kim, Y.-w., Yun, Y.-m. ve Nam, T.-h., The effect of the melt spinning processing parameters on the solidification structures in Ti-30at.% Ni-20at.% Cu shape memory alloys, Materials Science and Engineering: A, 438-440 (2006) 545-548.
88. Nakagawa, K., Kanadani, T., Mori, Y. ve Ishii, Y., The Effect of Jetting Temperature on the Fabrication of Rapidly Solidified Fe-Si-B Systems Alloys Using Single-Roller Melt Spinning, MATERIALS TRANSACTIONS, 52,2 (2011) 196-200.
89. Sheng, H.-c., Zeng, X.-r., Qian, H.-x. ve Fu, D.-j., Effect of melt treatment on the microstructure and magnetic properties of Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe nanocomposites, Journal of Non-Crystalline Solids, 356,1 (2010) 19-23.
90. Jassim, A.K. ve Hammood, A.S., Single Roll Melt Spinning Technique Applied to Produce Micro Thickness Rapid Solidified Ribbons Type 5083 (Al-Mg) alloy, International Parallel Conferences on Researches in Industrial and Applied Sciences Panel I: Engineering Applications, 2014, 1-7.

91. Thoma, D.J., Glasgow, T.K., Tewari, S.N., Perepezko, J.H. ve Jayaraman, N., Proceedings of the Sixth International Conference on Rapidly Quenched Metals Effects of process parameters on melt-spun Ag • Cu, Materials Science and Engineering, 98 (1988) 89-93.
92. Liu, Z.G., Chai, L.H. ve Chen, Y.Y., Effect of cooling rate and Y element on the microstructure of rapidly solidified TiAl alloys, Journal of Alloys and Compounds, 504 (2010) S491-S495.
93. Chen, Z., Luo, J., Sui, Y. ve Guo, Z., Effect of yttrium substitution on magnetic properties and microstructure of Nd-Y-Fe-B nanocomposite magnets, Journal of Rare Earths, 28,2 (2010) 277-281.
94. Cheng, S.F., Das, B.N., Wun-Fogle, M., Lubitz, P. ve Clark, A.E., Structure of melt-spun Fe-Ga-based magnetostrictive alloys, Magnetics, IEEE Transactions on, 38,5 (2002) 2838-2840.
95. Ausanio, G., Chiriac, H., Iannotti, V., Hison, C., Lanotte, L. ve Lupu, N., Consistency between morphology and magnetization data in studying the effect of production parameters in Nd_{90-x}Fe_xAl₁₀ (x=35–50) melt spun ribbons, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 265,2 (2003) 138-141.
96. Mendoza-Suárez, G., Escalante-García, J.I., López-Cuevas, J., Vargas-Gutiérrez, G., Mancha-Molinar, H. ve Mendez-Nonell, J., Effect of roll speed on the magnetic properties of nanocomposite PrFeB magnets prepared by melt-spinning, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 206,1–2 (1999) 37-44.
97. Cox, B.L. ve Steen, P.H., ‘Herringbone’ defect formation in planar-flow melt spinning, Journal of Materials Processing Technology, 213,10 (2013) 1743-1752.
98. Sowjanya, M. ve Kishen Kumar Reddy, T., Cooling wheel features and amorphous ribbon formation during planar flow melt spinning process, Journal of Materials Processing Technology, 214,9 (2014) 1861-1870.
99. Li, D., Zhuang, J., Liu, T., Lu, Z. ve Zhou, S., The pressure loss and ribbon thickness prediction in gap controlled planar-flow casting process, Journal of Materials Processing Technology, 211,11 (2011) 1764-1767.
100. Pagnola, M.R., Barone, M., Malmoria, M. ve Sirkin, H., Influence ofz/wrelation in Chill Block Melt Spinning (CBMS) process and analysis of thickness in ribbons, Multidiscipline Modeling in Materials and Structures, 11,1 (2015) 23-31.
101. Lewis, L.H., Collins, S.M., Kramer, M.J. ve Lo, C.C.H., Solidification, quenching gas and magnetic properties in melt-spun Nd₂Fe₁₄B, Magnetics, IEEE Transactions on, 37,4 (2001) 2486-2488.
102. Yapp, R., Davies, H.A., Leccabue, F. ve Watts, B.E., The influence of ambient gas pressure on the surface quality and magnetic properties of nanocrystalline NdFeB based melt spun ribbons, Materials Letters, 38,1 (1999) 33-38.

103. Todd, I., Davies, H.A., Gibbs, M.R.J., Leccabue, F. ve Watts, B.E., The effect of ambient gases on surface quality and related properties of nanocrystalline soft magnetic ribbons produced by melt spinning, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 196–197 (1999) 196-198.
104. Yang, H.W., Wang, R.C., Yuan, X.G., Li, R.D., Wang, J.Q. ve Tan, M.J., Importance of chamber gas pressure on processing of Al-based metallic glasses during melt spinning, Philosophical Magazine Letters, 91,10 (2011) 656-663.
105. Fiedler, H., Mühlbach, H. ve Stephani, G., The effect of the main processing parameters on the geometry of amorphous metal ribbons during planar flow casting (PFC), Journal of Materials Science, 19,10 (1984) 3229-3235.
106. Liebermann, H.H., The dependence of the Geometry of glassy alloy ribbons on the chill block melt-spinning process parameters, Materials Science and Engineering, 43,3 (1980) 203-210.
107. Anestiev, L.A. ve Russev, K.A., On the fluid dynamics of the formation of thin metal ribbons by rapid quenching from the melt, Materials Science and Engineering, 95 (1987) 281-286.
108. Pavuna, D., Production of metallic glass ribbons by the chill-block melt-spinning technique in stabilized laboratory conditions, Journal of Materials Science, 16,9 (1981) 2419-2433.
109. Kukulka, D.J., Poopisut, A. ve Mollendorf, J.C., New chill-block melt spinning relations to predict ribbon thickness, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 10,3 (1996) 545-547.
110. Panda, A.K., Roy, S., Singh, S.R., Rao, V., Pramanik, S., Chattoraj, I., Mitra, A. ve Ramachandrarao, P., Effect of quenching rate on the properties of melt-spun FeNbCuSIB ribbons, Materials Science and Engineering: A, 304–306 (2001) 457-461.
111. Liebermann, H.H., Coaxial jet melt-spinning of glassy alloy ribbons, Journal of Materials Science, 15,11 (1980) 2771-2776.
112. Lee, S.M., O'Reilly, K.A.Q., Cantor, B. ve Hong, C.P., Microstructural transitions in Al–Cu ribbons manufactured by planar flow casting, Materials Science and Engineering: A, 249,1–2 (1998) 233-240.
113. Verma, A., Kumar, S., Grant, P.S. ve O'Reilly, K.A.Q., Influence of cooling rate on the Fe intermetallic formation in an AA6063 Al alloy, Journal of Alloys and Compounds, 555 (2013) 274-282.
114. Samuel, F.H., Samuel, A.M., Doty, H.W. ve Valtierra, S., Decomposition of Fe-intermetallics in Sr-modified cast 6XXX type aluminum alloys for automotive skin, Metallurgical and Materials Transactions A, 32,8 (2001) 2061-2075.

115. Xu, C.L., Wang, H.Y., Qiu, F., Yang, Y.F. ve Jiang, Q.C., Cooling rate and microstructure of rapidly solidified Al–20wt.% Si alloy, Materials Science and Engineering: A, 417,1-2 (2006) 275-280.
116. Rajabi, M., Simchi, A. ve Davami, P., Microstructure and mechanical properties of Al–20Si–5Fe–2X (X=Cu, Ni, Cr) alloys produced by melt-spinning, Materials Science and Engineering: A, 492,1-2 (2008) 443-449.
117. Rajabi, M., Vahidi, M., Simchi, A. ve Davami, P., Effect of rapid solidification on the microstructure and mechanical properties of hot-pressed Al–20Si–5Fe alloys, Materials Characterization, 60,11 (2009) 1370-1381.
118. Mitra, A., Panda, A.K., Rao, V., Singh, S.R. ve Ramachandrarao, P., Preparation and characterization of Fe–Nb–Cu–Si–B-based nanocrystalline soft magnetic materials, Applied Surface Science, 182,3–4 (2001) 321-325.
119. Seino, R. ve Sato, Y., Observation of melt puddle behavior in planar flow casting in air, Journal of Alloys and Compounds, 586, Supplement 1 (2014) S150-S152.
120. Gögebakan, M., Uzun, O., Karaaslan, T. ve Keskin, M., Rapidly solidified Al–6.5 wt.% Ni alloy, Journal of Materials Processing Technology, 142,1 (2003) 87-92.
121. Karaköse, E. ve Keskin, M., Effect of solidification rate on the microstructure and microhardness of a melt-spun Al–8Si–1Sb alloy, Journal of Alloys and Compounds, 479,1–2 (2009) 230-236.
122. Cheng, S., Das, B., Wun-Fogle, M., Lubitz, P. ve Clark, A., Structure of melt-spun Fe-Ga-based magnetostrictive alloys, Magnetics, IEEE Transactions on, 38,5 (2002) 2838-2840.
123. Miao, X.F., Wang, Y.G. ve Guo, M., Structural, thermal and magnetic properties of Fe–Si–B–P–Cu melt-spun ribbons: Application of non-isothermal kinetics and the amorphous random anisotropy model, Journal of Alloys and Compounds, 509,6 (2011) 2789-2792.
124. Wang, H.-w., Zhu, D.-d., Zou, C.-m. ve Wei, Z.-j., Microstructure and nanohardness of Ti-48%Al alloy prepared by rapid solidification under different cooling rates, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 21, Supplement 2 (2011) s328-s332.
125. Neikov, O.D., Murashova, I., Yefimov, N.A. ve Naboychenko, S., Handbook of non-ferrous metal powders: technologies and applications, Elsevier, 2009.
126. Webster, D., Properties and microstructure of aluminum-copper-magnesium-lithium alloys, Metallurgical Transactions A, 10,12 (1979) 1913-1921.

127. Frazier, W.E. ve Thompson, J.J. Microstructural and phase characterization of RST Al-Ti-X alloys. Final report, 1 October 1987-1 July 1988, Medium: X; Size: Pages: 19.
128. Xie, J.W., Zhao, Y.Y. ve Dunkley, J.J., Effects of processing conditions on powder particle size and morphology in centrifugal atomisation of tin, Powder Metallurgy, 47,2 (2004) 168-172.
129. Sheikhaliev, S.M., Sheikhalieva, Z.I. ve Dunkley, J.J., Spin atomisation makes tighter, safer aluminium, Metal Powder Report, 63,2 (2008) 28-30.

ÖZGEÇMİŞ

Sefa Emre SÜNBL 1990 yılında İzmir'in Karşıyaka ilçesinde doğdu. 2007 yılında Çanakkale Süper Lisesi'nden mezun olup Trabzon Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 2011 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi'nden "Metalurji ve Malzeme Mühendisi" unvanı ile mezun oldu. Aynı yıl K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda lisansüstü eğitime başladı. 2014 yılında ÖYP ile Gaziantep Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. 2015 yılında K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'nde 35. Madde ile görevine devam etmektedir. İyi derecede İngilizce bilmektedir.