

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DÜŞÜK BASINÇLI DÖKÜM KALIPLARI İÇİN POTEYAJ
UYGULAMASINA ALTERNATİF TERMAL SPREY YÖNTEMLERİ
İLE TERMAL BARIYER KAPLAMA UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Samet TÜRKAN

Enstitü Anabilim Dalı

**: METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**

Tez Danışmanı

: Yrd. Doç. Dr. Ekrem ALTUNCU

Mayıs 2017

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

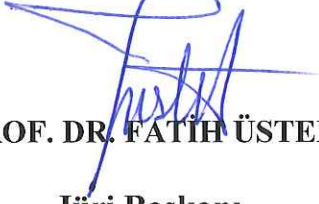
DÜŞÜK BASINÇLI DÖKÜM KALIPLARI İÇİN POTEYAJ
UYGULAMASINA ALTERNATİF TERMAL SPREY YÖNTEMLERİ
İLE TERMAL BARIYER KAPLAMA UYGULAMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Samet TÜRKAN

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 12 / 06 /2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


PROF. DR. FATİH ÜSTEL

Jüri Başkanı


DOÇ. DR. ARMAĞAN
ARICI

Üye


YRD. DOÇ. DR. EKREM
ALTUNCU

Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Samet TÜRKAN

10.05.2017

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Ekrem ALTUNCU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünden Prof. Dr. Fatih ÜSTEL'e, Uzman Cihan ÇALIŞKAN'a ve Sakarya Üniversitesi Termal Sprey Uygulama ve Araştırma Laboratuvarı (TESLAB) personeline teşekkür ederim. Ayrıca proje ortağı CMS Jant ve Makine San. AŞ. Şirketine ve Arge Merkezi Müdürü Özgür OKÇUOĞLU'na; Arge Mühendisleri Ömer BURAK ÇE'ye, Işık YILMAZ OKÇU'ya, Caner KALENDER'e ve diğer personeline teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Bilim Teknoloji Genel Müdürlüğü'ne (SANTEZ Proje Kodu 0270.STZ.2013-2) ve Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2014-09-08-002) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	x
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Otomotiv Sektöründe Basınçlı Döküm Teknolojisi.....	1
1.2. Otomotiv Sektöründe Alüminyum Alaşımlarının Kullanımı ve Talepler.....	2
..	
BÖLÜM 2.	
JANT ALAŞIMLARI VE TEKNİK ZELLİKLERİ.....	6
2.1. Jant Sektörü Analizi.....	6
2.2. Jant Alaşımları ve Metalurjik Özellikleri.....	7
2.2.1. Alüminyum döküm alaşımlarının sınıflandırılması.....	8
2.3. Jant Üretiminde Kullanılan Üretim Yöntemleri.....	15
BÖLÜM 3.	
DÜŞÜK BASINÇLI ALÜMİNYUM DÖKÜM PROSESİ	17
3.1. Giriş.....	17
3.2. Döküm İşlemi Ve Parametreleri.....	18

3.3. Döküm Kalıpları Ve Kalıp Malzemeleri.....	19
3.4. Alüminyum Döküm Jant Alaşımlarının Metalurjik Özellikleri.....	234
3.5. Döküm Hataları.....	28
3.5.1. Sıvı metal kalıp yapışma mekanizması.....	31
3.5.2. Yüzey pürüzlülüğü etkisi.....	33
3.5.3. Kalıp sıcaklığı etkisi.....	33
3.5.4. Alaşımın kimyasal kompozisyonun etkisi.....	34
3.6. A356 Alüminyum Alaşımı Jant Üretiminde Döküm-Sıcaklık, Basınç Verilerinin Analizi.....	35
3.6.1. Kalıp-Sıvı Metal Arası Etkileşimler.....	36
3.7. CMS Jant Kalıbında Deneysel Faaliyetler.....	46
3.7.1. Sıvı metalin kalıba dolumu esnasında sıcaklık değişimi.....	46
3.7.2. Sıvı metalin katılaşması esnasında sıcaklık değişimi.....	49
3.7.3. Kalıbın sıvı metal ile dolumu esnasında basınç değerlerinin değişimi.....	51
 BÖLÜM 4	
KALIP KAPLAMA (POTEYAJ) UYGULAMASI.....	54
4.1. Sıvı Metal Akışkanlık Testi.....	58
 BÖLÜM 5	
TERMAL SPREY KAPLAMALAR.....	60
5.1. Termal Sprey Kaplama Yöntemleri.....	61
5.1.1. Toz Alev Sprey.....	63
5.1.2. Tel alev sprej (FS-Wire).....	64
5.2. Termal Bariyer Kaplamalar Ve Genel Özellikleri.....	65
5.2.1. MSZ – YSZ karakterizasyonu.....	66
5.2.2. Yitria stabilize zirkonya.....	67
5.2.3. Magnezya stabilize zirkonya.....	68
 BÖLÜM 6	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	69

6.1. Numunelerin Hazırlanışı.....	69
6.2. Alev Sprey Kaplama İşlemi.....	70
6.3. Plazma Sprey Kaplama İşlemi.....	70
6.4. Test Analiz ve Karakterizasyon Çalışmaları.....	71

BÖLÜM 7

DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	71
7.1. Kaplama Tozlarının Toz Boyut Dağılımları.....	71
7.2. Poteyaj Kaplamaların Toz Formunda XRD Analizleri.....	73
7.3. Kaplama Tozlarının XRD Analizleri.....	75
7.4. Kaplama Uygulanmış Numunlerin XRD Analizleri.....	76
7.5. Kaplama Tozlarının SEM Analizleri.....	77
7.6. Kalınlık Ölçümü Sonuçları.....	79
7.7. Yüzey Pürüzlülük Testi Sonuçları.....	79
7.8. Üst Yüzey Mikroskobik İncelemeler.....	80
7.9. Numune Kesitlerinin Mikroskobik İncelemeleri.....	83
7.10. Alev Sprey Ve Plazma Sprey Kaplama Uygulanmış Numunelerin Mikrosertlik Ölçümleri.....	86
7.11. Poteyaj ve Termal Sprey Kaplama uygulanmış Numunelerin Islatr Açısı Ölçümleri.....	89
7.12. Yapışma Testleri.....	92
7.13. Sıvı Metal Akışkanlık Testi Sonuçları.....	96
7.14. Yapılması Önerilen Çalışmalar.....	101

BÖLÜM 8

TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	102
KAYNAKLAR.....	105
ÖZGEÇMİŞ.....	108

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A.S	: Alev sprej
AISI	: Amerika Çelik Standartları
APS	: Atmosferik plazma püskürtme
ASTM	: Amerikan standardı
BN	: Bor Nitrür
D140	: Dycote 140(Ticari kod)
D34	: Dycote 34(Ticari kod)
D39	: Dycote 39(Ticari kod)
EDX	: Enerji dispersif x-ray spektroskopisi
FDM	: Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler
HV	: Vickers sertlik
HVOF	: Yüksek hızlı oksit - yakıt püskürtme
LPDC	: Düşük basınçlı döküm kalıbı (Low Pressure Die Casting)
M	: Magnezyum oksit ile stabilize edilmiş zirkonyum oksit tozu
MB	: Magnezya stabilize zirkonya oksit ve bor nitrür tozu karışımı
MBP	: Magnezya stabilize zirkonyum oksit, bor nitrür ve teflon tozları karışımı
MPa	: Mega Paskal
MSZ	: Magnezya oksit ile stabilize edilmiş zirkonyum oksit
NLPM	: Normal Liter Per Minute
P.S	: Plazma sprej
PTFE	: Teflon
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
TBC	: Termal Bariyer Kaplama(Thermal Barrier Coating)
XRD	: X ışını Difraksiyonu
YSZ	: Yttriyum oksit ile Stabilize edilmiş zirkonyum oksit

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Avrupa araçlarında al kullanım miktarının yıllara göre değişimi	3
Şekil 1.2 Farklı model ve markalar için alüminyum kullanımı.....	3
Şekil 1.3. Otomobillerde alüminyum alaşımlarının potansiyel uygulamaları.....	4
Şekil 2.1. Farklı marka araçlar için alüminyum alaşımı jant tasarımları.....	8
Şekil 2.2. AlSi alaşımlarına T6 ısıt işlemleri öncesi ve sonrası mikro yapı.....	12
Şekil 2.3. Dövme ile jant üretimi işlem basamakları.....	15
Şekil 2.4. Kum kalıba döküm yöntemi ile jant üretimi.....	15
Şekil 2.5. Düşük basınçlı döküm yöntemi ile seri halde jant üretimi.....	16
Şekil 2.6. Döküm Proseslerinin Ekonomik Ve Seri Üretim Açısından Karşılaştırması.....	16
Şekil 3.1. Düşük basınçlı döküm prosesi ve döküm makinası.....	17
Şekil 3.2. Alüminyum jant döküm sistemi.....	18
Şekil 3.3. a) Düşük basınçlı jant döküm kalıbı kesiti, b) Kalıp bileşenleri.....	20
Şekil 3.4. a) Eriyik metalin kalıba girişi, b) Kalıbın dolum simülasyonu c) röntgen filmi ve d) döküm mikroyapısı.....	22
Şekil 3.5. Jant üretiminde iş akışı a) Döküm+ ısıt işlem sonrası talaşlı imalat, b) Kalite kontrol c)-d) Boya hattı ve stok.....	23
Şekil 3.6. a) Jant alaşımının farklı bölgelerinin mikroyapıları (S:Spoke, R: Rim H:hub) döküm yapısı b) T6 ısıt işlem sonrası yapı	24
Şekil 3.7. Farklı çözeltiliye alma sıcaklıklarının A356 mikroyapısında Si parçacıklarının morfolojisine T6 işlemleri öncesi ve sonrası etkisi.....	25
Şekil 3.8. Çözeltiliye alma sıcaklıklarının A356 alaşımının mekanik özelliklerine etkisi.....	26

Şekil 3.9. Jant alaşımı mikroyapısında a. döküm yapısı çubuk şeklinde Al-Si ötektik yapı b. T6 ısıtım işlem sonrasında küresel formda ötektik yapı optik mikroskop görüntüleri.....	26
Şekil 3.10. Soğuma hızına bağlı dentriler arası mesafe ve sertlik değişimi	27
Şekil 3.11. a). Makro porozite görüntüsü b) Röntgen Filmi c) Makro yüzey....	29
Şekil 3.12. Hidrojen çözünürlüğü nedenli mikro hatalar.....	31
Şekil 3.13. Sıvı alüminyum ve kalıp çeliği arasındaki difüzyon etkisiyle intermetalik, etkisiyle yüzeyde lehimleme problemleri.....	32
Şekil 3.14. a). Saflığa bağlı sıvı fraksiyonu, b) Saf Al/çelik ara yüzey mikro görüntüsü, c) Demir artışı ile sıvı fraksiyonun bağıntısı.....	34
Şekil 3.15. Yüzeye nüfus eden ergiyik alüminyum arayüzeyde intermetalik faz oluşumu.....	35
Şekil 3.16. Düşük basınçlı döküm esnasında basınç değişim eğrisi.....	37
Şekil 3.17. LPDC prosesi ile jant üretiminde anlık sıcaklık değişimi görüntüleri.....	38
Şekil 3.18. Jant üzerinde hata riski bölgeler ve röntgen filminde gerçek hata pozisyonları.....	39
Şekil 3.19. Soğutma sisteminin jant parçasının katılma davranışına etkisi...	39
Şekil 3.20. Sıvı metal kalıp boşluğunu dolumunda çevreye olan ısı transferi.....	41
Şekil 3.21. Henüz dökülen jantın sıcaklık değişimi ve ısı transferi yönü a) Döküm parçası, b) Kalıp parçaları.....	46
Şekil 3.22. Sıvı metalin kalıp boşluğunu doldurması esnasında kalıp üzerinde sıcaklık ölçümü yapılan noktalar (30 sn sonrasında).....	47
Şekil 3.23. Dolum esnasında belirlenen noktaların sıcaklık değişimleri.....	48
Şekil 3.24. Katılma esnasında belirlenen noktaların soğuma eğrileri.....	50
Şekil 3.25. Basınç ölçümü yapılan noktalar.....	52
Şekil 3.26. Sıvı metal basıncı için ölçülen noktaların P-t eğrileri.....	53
Şekil 4.1. Poteyaj sprej tabancası ve Poteyaj uygulaması esnasında.....	56
Şekil 4.2. Poteyaj kaplamalar için kalıp sıcaklığına bağlı aşınma etkisi ile kalınlık değişimi grafiği.....	57
Şekil 4.3. Poteyaj kaplamanın kalınlığının yalıtım kabiliyetine etkisi.....	57
Şekil 4.4. Sıvı metal akışkanlık test kalıbı.....	58

Şekil 4.5. Double-spiral akışkanlık testi şematik gösterimleri.....	59
Şekil 5.1. Termal sprej kaplamanın şematik görünümü	60
Şekil 5.2. Isı kaynaklarına göre termal sprej kaplama yöntemleri	62
Şekil 5.3. Termal sprej proselerinin alev sıcaklığı-partikül hızı grafiği.....	62
Şekil 5.4. Tel/çubuk alev sprejin şematik görünümü ve bölgeleri.....	63
Şekil 5.5. Plazma sprej prosesinin şematik görünümü.....	64
Şekil 5.6. Termal bariyer kaplama katmanlarının şematik görünümü.....	66
Şekil 5.7. Termal kaplama sistemlerinde kullanılan kompozisyonlar.....	66
Şekil 5.8. ZrO ₂ ve Y ₂ O ₃ şematik kristal kafes sistemi.....	67
Şekil 5.9. MSZ'nin faz diyagramı.....	68
Şekil 6.1. Toz analizi cihazı ve SEM cihazı resimleri.....	70
Şekil 6.2. Çekme test cihazı ve mikro sertlik cihazı.....	71
Şekil 6.3. Termal sprej multi tabanca kabini, alev sprej tabancası ve plazma sprej tabancası.....	72
Şekil 7.1. CoCrNiAl esaslı bağ tabakası tozlarının toz boyut dağılımlarını veren grafik.....	71
Şekil 7.2. Kaplama işlemlerinde kullanılan MSZ tozlarının ortalama toz boyutu ve toz boyut dağılımını gösteren grafik.....	72
Şekil 7.3. BN tozlarının toz boyutu dağılımlarını gösteren grafik.....	72
Şekil 7.4. PTFE tozlarının toz boyut dağılımlarını gösteren grafik.....	73
Şekil 7.5. D-34 poteyaj kaplama malzemesinin kaplama ve toz halindeki XRD sonuçları.....	74
Şekil 7.6. D-39 koduna sahip poteyajın kaplama ve toz halindeki XRD Analizleri.....	74
Şekil 7.7. D-140 poteyaj malzemesinin kaplama ve toz hali üzerinden alınan X sonuçları.....	75
Şekil 7.8. Kaplamada kullanılan tozların XRD faz analizleri.....	75
Şekil 7.9. Alev sprej kaplama uygulanmış test numuneleri üzerinden alınan XRD paternleri.....	76
Şekil 7.10. Plazma sprej kaplama uygulanmış olan test numuneleri üzerinden alınan XRD paternleri.....	77

Şekil 7.11. Alev sprej ve plazma sprej kaplama uygulanmış numuneler ile pot kaplama uygulanmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerini karşılaştıran grafik.....	80
Şekil 7.12. Poteyaj(a) ve termal sprej(b,c) kaplama numunelerinin zamana göre ıslatma açılarındaki değişim grafikleri.....	89
Şekil 7.13. ASTM C633 testinde kullanılan numunelerin yapıştırma şekli.....	90
Şekil 7.14. ASTM C633 testi uygulanan numunelerin yapışma mukavemeti.....	94
Şekil 7.15. Sıvı metal akışkanlık test kalıbının alev sprej kaplama prosesi ile kaplanması.....	95
Şekil 7.16. Sıvı metal akışkanlık testi uygulaması.....	95
Şekil 7.17. Alev sprej ve plazma sprej kaplama uygulaması ile poteyaj uygulamasının sıvı metal akışkanlık testi sonuçlarını karşılaştıran grafik.....	100

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırma kodları.....	9
Tablo 2.2. Alüminyum döküm alaşımlarının kimyasal bileşimleri.....	10
Tablo 2.3. A356 döküm alaşımlarının mekanik özellikleri.....	11
Tablo 2.4. A356,A360,A380 Alüminyum alaşımlarının fiziksel özellikleri.....	12
Tablo 2.5. Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısı işlemleri ve kodları.....	13
Tablo 2.6. Uygun jant alaşımının seçimi.....	14
Tablo 3.1. Kalıplarda kullanılan malzemelerin termo-fiziksel özellikleri.....	21
Tablo 3.2. Spoke üzerinde farklı proses sıcaklıklarına bağlı olarak katılma hız değişimi.....	40
Tablo 3.3. LPDC prosesinde ısı transferi 4 adımda şu şekilde ele alınmaktadır.....	42
Tablo 3.4. Jant kalıbı üzerinde ara yüzeylerde ısı transfer katsayısının değişimi.....	42
Tablo 3.4. Jant kalıbı üzerinde ara yüzeylerde ısı transfer katsayısının değişimi(Devamı).....	43
Tablo 3.5. Jant kalıbı üzerinde kullanılan malzemelerin ısı transfer katsayısının değişimi.....	44
Tablo 3.5. Jant kalıbı üzerinde kullanılan malzemelerin ısı transfer katsayısının değişimi(Devamı).....	45
Tablo 6.1. Kaplama işleminde kullanılan toz karışımları.....	68
Tablo 6.2. Alev spreli kaplama işlemi ile hazırlanmış olan numunelerin üst yüzey SEM görüntüleri.....	69
Tablo 7.1. Kaplama işleminde kullanılan (Bağ-Seramik) kaplama tozlarının SEM görüntüleri.....	79
Tablo 7.2. Alev spreli kaplama numunelerinin kalınlık ölçümlerinin ortalama değerleri.....	80

Tablo 7.3. Alev sprej ve plazma spreyle kaplama uygulanmış numunelerin yüzey pürüzlülükleri.....	81
Tablo 7.4. Poteyaj kaplamalarının yüzey ve kesit incelemesi.....	82
Tablo 7.5. Alev sprej kaplama işlemi ile hazırlanmış olan numunelerin üst yüzey SEM görüntüleri.....	83
Tablo 7.6. Plazma Sprej kaplama işlemi uygulanarak hazırlanmış numunelerin yüzey SEM görüntüleri.....	84
Tablo 7.6. Plazma Sprej kaplama işlemi uygulanarak hazırlanmış numunelerin yüzey SEM görüntüleri(Devamı).....	85
Tablo 7.7. Alev sprej kaplama numunelerinin kesitleri üzerinden alınan SEM görüntüleri.....	86
Tablo 7.8. Plazma sprej kaplama numunelerinin kesitleri üzerinden alınan SEM görüntüleri.....	87
Tablo 7.8. Plazma sprej kaplama numunelerinin kesitleri üzerinden alınan SEM görüntüleri(Devamı).....	88
Tablo 7.9. Alev sprej ve plazma sprej kaplama prosesleriyle hazırlanmış olan numunelerin ortalama mikro-sertlikleri.....	89
Tablo 7.10. Poteyaj ve termal sprej kaplama uygulanmış numune yüzeylerinin ıslatma açısı ölçüm sonuçları.....	89
Tablo 7.11. Poteyaj kaplama uygulanmış numunelerin ASTM C633 test sonuçları.....	92
Tablo 7.12. Alev sprej kaplama uygulanmış numunelerin ASTM C633 test sonuçları.....	93
Tablo 7.13. Plazma sprej kaplama uygulanmış numunelerin ASTM C633 test sonuçları.....	95
Tablo 7.14. Sıvı metal akışkanlık testi sonuçları.....	98
Tablo 7.14. Sıvı metal akışkanlık testi sonuçları(Devamı).....	99
Tablo 7.15. Poteyaj, alev sprej ve plazma sprej kaplama uygulanmış kalıplar çıkarılan döküm parçalarının yüzey pürüzlülük değerleri.....	100

ÖZET

Anahtar kelimeler: Termal Bariyer Kaplama (TBC), Düşük Basınçlı Döküm, Jant, Alüminyum Döküm, Kalıp

Alüminyum alaşımlarının düşük basınçlı dökümünde proses performansını artırmak amacıyla uzun yıllardır döküm kalıplarına kaplama uygulanmaktadır. Özellikle düşük basınçlı döküm veya gravite döküm proseslerinde kalıp boşluğunun dolumu yüksek basınçlı döküm proseslerine göre kısmen daha fazla zaman almaktadır. Erken katılaşmayı engellemek amacıyla metalik kalıp yüzeylerinde termal yalıtım görevi sağlayan kaplamalar kullanılmaktadır. Poroziteli olan bu kaplamalar hem termal bariyer görevi yapmakta hemde sıvı metalin erozif aşınma ve korozyon etkilerine karşı kalıbı korumaktadır. Ancak bu ticari kullanılan kalıp kaplamaların zayıf mekanik dayanımı ve aşınma direnci proses sürecinde önemli oranda bakım ve tamir maliyetlerine neden olmaktadır. Bu durum gerek üretimi hızını ve verimliliğini engellemekte, birkaç vardiya içerisinde üretim duruşlarına yol açmaktadır. Kaplamanın aşınması ve kesit kalınlığının azalması nedeniyle ısı transferi değişimi söz konusu olmakta, bunun sonucunda katılaşma hızının değişimi döküm ürününde de mikroyapısal değişikliklere dökümde gözenek oranında artışa neden olmaktadır. Döküm prosesinin verimliliğini artırmak amacıyla uzun ömürlü ve dayanıklı kaplamalara ihtiyaç duyulmaktadır. Kaplamaların dayanımı çoğunlukla yapışma mukavemetine ve aşınma direncine bağlıdır. Yapışma dayanımını artırmak amacıyla termal spreylere kaplama teknikleri düşünülmüştür. Bu tez çalışmasında MgO ile stabilize zirkonya esaslı ve polimer-parçacık katkılı kaplamaların alev ve/veya plazma spreylere yöntemleri ile üretimi ve kaplama performansı araştırılmıştır. Kaplamaların kompozisyonuna ve üretim yöntemine bağlı olarak mekanik özellikleri, yüzey özellikleri ve uygulanabilirliği teknik ve ekonomik açıdan karşılaştırmalı olarak karakterize edilmiş ve incelenmiştir.

AN ALTERNATIVE METHODS FOR POTEYAJ APPLICATION WITH THERMAL SPRAY THERMAL BARRIER COATING APPLICATION IN LOW PRESSURE DIE CASTING

SUMMARY

Keywords: Thermal Barrier Coating (TBC), Low Pressure Die Casting, Wheel, Aluminium Casting, Mold

Die coatings have been used for low pressure die casting of aluminium alloys for improved process performance for many decades. Essentially during low pressure and gravity die casting, the die cavity takes longer time to fill in compared with high pressure die casting, and as a result to prevent premature solidification of the casting alloy a thermal insulating coating is applied to the metallic die surface. The porous coating provides good thermal insulation and also provides protection from erosion and corrosion from contact with molten metal. However, these coatings are fragile and the wear properties are poor, requiring frequent costly and often in-situ maintenance to maintain the coating in service. These coating have a relatively short service life and production is frequently interrupted to replace the die coat after only a few shifts. In addition, maintaining cast product quality is difficult because as the die coating wears and reduces in thickness, the heat transfer alters changing the solidifying pattern of the aluminium alloy and porosity position. To improve productivity and reduce the production costs there was a need to develop a durable insulating die coat for low pressure die casting. Durability of a die coat is largely dependent on the bond strength and wear resistance. To achieve stronger bonding, thermal spraying techniques were considered. In this thesis project the new developed coatings performance for thermal sprayed (APS, Flame spray) MgO stabilized ZrO₂ with polymer and BN particle reinforced coatings were investigated. The microstructure, surface and mechanical properties of the coatings are characterized and their applicability is investigated and also compared by technically and economically depend on composition and spray method.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Otomotiv Sektöründe Basınçlı Döküm Teknolojisi

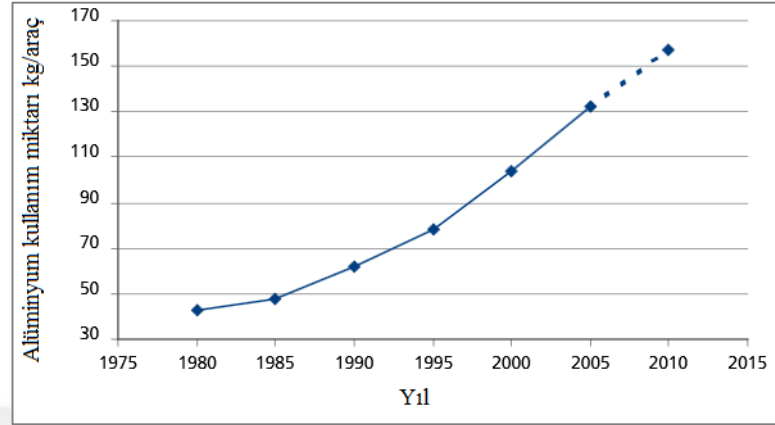
Otomotiv endüstrisinde çelik ve dökme demir gibi yoğunluğu yüksek alaşımların yerine daha düşük yoğunluklu hafif alaşımların kullanımı hızla yaygınlaşmaktadır. Özellikle otomobil jantlarında gerek estetik açıdan gerek tasarım esnekliği açısından sağladığı avantajlar nedeniyle alüminyum alaşımlarının kullanımının arttığı gözlenmektedir. Günümüzde birçok ülkede ve dünyada hemen hemen tüm araçlarda alüminyum döküm alaşımı jantlar kullanılmaktadır [1]. Hızlı gelişen jant sektöründe rekabet nedeniyle teknik beklentiler sürekli artmaktadır. Jant tasarımının; yüzey özellikleri, darbe dayanımı, korozyon direnci, yorulma ömrü, mikro yapısal homojenliği, geometrik toleransları ve balans özellikleri üzerinde yoğun çalışmalar sürdürülmektedir. Jant üretiminde yaygın olarak kullanılan döküm yöntemi düşük basınçlı döküm tekniğidir. Bu yöntem diğer geleneksel döküm yöntemlerine göre daha hızlı ve yüksek kapasiteli bir üretim tekniğidir. Sabit bir kalıp kullanılarak binlerce döküm seri halde gerçekleştirilmektedir. Bu proses kapsamında ortaya çıkan hurda ve fire oranı geleneksel yöntemlere göre önemli oranda daha düşüktür. Hurda ve fire oranları genellikle katılma hızı kontrolü ve döküm kalıbı termal özelliklerinden etkilenmektedir. Prosesin verimliliği düşük basınçlı döküm kalıbının ömrü ve performansı ile doğrudan ilişkilidir [2]. Düşük basınçlı döküm prosesi yüksek basınçlı (metal enjeksiyon) prosesine göre gerek uygulama basıncı, katılma hızı ve kalıp özellikleri açısından belirgin farklılıklar içermektedir. En belirgin farklılık yüksek basınçlı döküm prosesine göre oldukça düşük basınçlarda sıvı metalin kalıp boşluğuna yavaş ve kontrollü bir şekilde yer çekimi etkisiyle doldurulması ve katılmanın daha yavaş gerçekleştirilmesidir. Kalıbın içerisinde katılma hızını kalıp kaplaması (poteyaj) kontrol etmektedir. Poteyaj kaplaması sıvı metalin kalıp içerisinde ihtiyacı olan soğuma hızını yavaşlatmakta ve sıvı metal sıcaklığını koruyarak akışkan haldeki

metalin kalıbı tamamen doldurmasına imkan sağlamaktadır. Yüksek maliyetli olan döküm kalıbının prosese hazırlanması aşaması ve ön hazırlık işlemleri (kalıbı açma, döküm makinasından çıkarma, kalıbı ayırma ve kalıba poteyaj kaplama uygulaması, kalıp toplama ve kalıbın bağlanması) oldukça zaman almaktadır. Bu nedenle kalıbın çevrimsel olarak döküm baskı sayısının artırılması ve kalıbın termal (ısı yalıtım) özelliklerinin korunması oldukça önem taşımaktadır. Aksi halde döküm ürünlerde yüzey hataları ve ek işlem gereksinimleri önemli ölçüde artış göstermektedir. Bunun yanında poteyaj kaplamanın ömrü belirli bir baskı sayısı ile sınırlıdır. Yaklaşık 400 baskı sonrasında poteyaj kaplamanın aşınması ile kalınlığının azalması sonucunda kalıbın termal iletkenliğinin artması etkisi ile termal rejimi olumsuz etkilenmekte ve fire oranlarının artmasına neden olmaktadır. Gerek üretim maliyetleri, gerek fire/hurda maliyetleri, gerek ek işlem işçilik ve zaman kayıp maliyetleri, gerekse poteyaj sarfiyatı nedeniyle üretim verimliliği düşmektedir. Bu tez çalışması kapsamında amacımız; poteyaj kaplamaya alternatif olarak termal spreycaplama yöntemleri ile refrakter esaslı (ZrO_2) kalıp kaplaması olarak uygulanabilirliğinin araştırılması, farklı kaplama kompozisyonları geliştirilerek kalıp kaplama performansının artırılması hedeflenmektedir. Bu sayede döküm baskı adedi artırılabilecek, hurda fire oranları azaltılacak ve aşınma özellikleri daha yüksek olan kalıp kaplaması sayesinde daha uzun ömürlü bir kalıp performansı sağlanmış olacaktır.

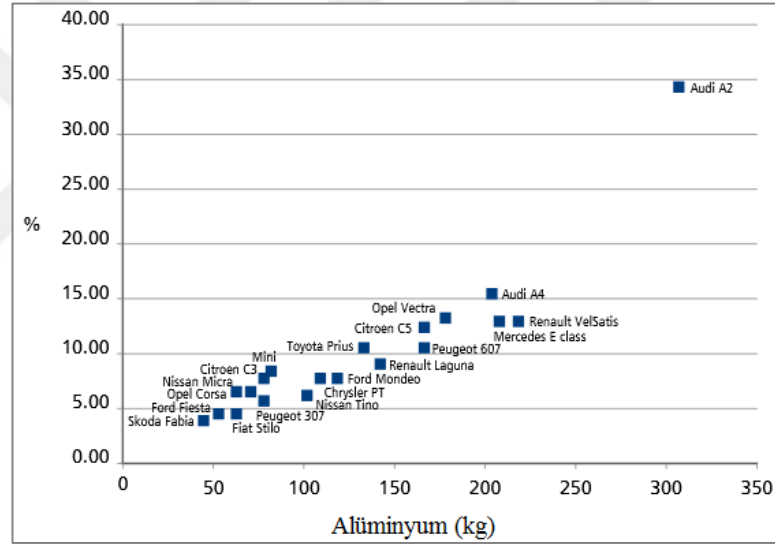
1.2. Otomotiv Sektöründe Alüminyum Alaşımlarının Kullanımı ve Talepler

Küresel pazarda otomotiv üreticileri ve yan sanayisi otomobillerde kullanılan parçaların hafif, çevre dostu, geri dönüştürülebilir ve ekonomik olmasını talep etmektedir. Artan çevre kirliliği ve emisyonlar nedeniyle son yıllarda daha hafif ve daha az yakıt tüketen araçlar üzerinde yoğun bir ilgi söz konusudur. Bu bağlamda alüminyum alaşımları birçok açıdan avantaj sağlamaktadır [1-3]. Hızlı gelişen otomotiv sektöründe de sürekli olarak alüminyum kullanımında artış gözlenmektedir (Şekil 1.1.). Alüminyumun otomotiv sanayiindeki kullanımına ilişkin olarak Jaguar, Audi, Lotus, Porsche ve Toyota gibi önde gelen otomobil üreticileri yoğun çalışmalar sürdürülmektedir (Şekil 1.2.). Audi kaportası tamamen alüminyumdan oluşan A8 modelini piyasaya çıkarmıştır. Bugün Avrupa otomobillerinde 150 kg, Japon ve

Amerikan otomobillerinde ise 160 kg dolaylarında alüminyum alaşımları kullanılmaktadır [3].



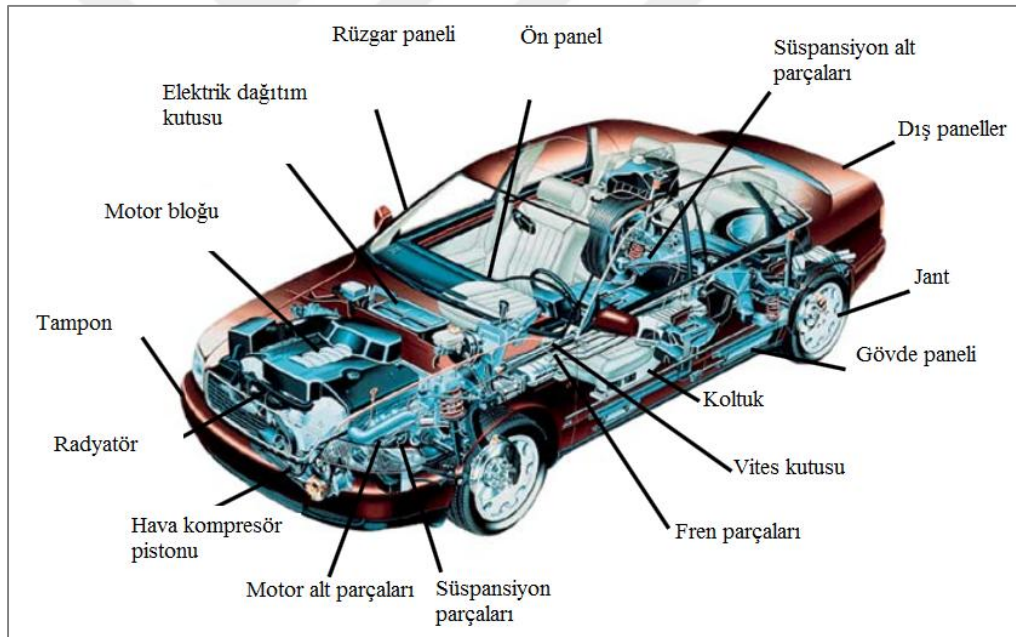
Şekil 1.1. Avrupa araçlarında alüminyum kullanım miktarının yıllara göre değişimi[3].



Şekil 1.2. Farklı model ve markalar için alüminyum kullanımı [3].

Alüminyum kullanılan bir otomobil, alüminyum kullanılmamış bir otomobile kıyasla, ekonomik ömrü boyunca 1500 litre daha az yakıt harcadığı hesaplanmaktadır. Alcoa tarafından yapılan bir araştırmaya göre alüminyum alaşımından kaporta ve şasiye sahip otomobiller çelik kullanılan otomobillere göre %25 daha az yakıt tüketeceği, kullanım ömrü boyunca bir otomobilin 500.000 km yapacağı düşünüldüğünde ise alüminyum alaşımının yoğun kullanıldığı otomobilin 10.000 litre daha az yakıt harcadığı, CO₂ emisyonunun da 3 ton azalacağı hesaplanmıştır.

Alüminyum alaşımlarının; çelik alaşımlarına (7.8 gr/cm^3) göre neredeyse $1/3$ oranında düşük yoğunluğa (2.7 gr/cm^3) sahip olması, üstün korozyon direnci, yüksek spesifik mukavemet özellikleri, kolay geri dönüşüm ve seri döküm kabiliyeti otomotiv sektöründe yaygın kullanım alanı bulmasında etkin rol oynamaktadır. Günümüz otomobillerinde marka ve modele bağlı olarak %8-15 oranında (70-150 kg) alüminyum kullanımı söz konusudur. Başlıca kullanım alanları: motor blokları, jant, egzoz manifoldu, transmisyon kutusu, diferansiyel kutusu, radyatör parçaları, fren parçaları, gövde paneli bunlardan birkaçıdır (Şekil 1.3.). Kullanılan alüminyum alaşımlarının %72'si basınçlı döküm prosesleri (%34 Düşük basınçlı döküm, %38 Yüksek basınçlı döküm) ile üretilmektedir. Özellikle metal enjeksiyon (basınçlı döküm) tekniğinin diğer geleneksel döküm yöntemlerine göre daha fazla kapasitelerde (adet), daha hızlı ve ekonomik olarak üretilmesinin önemi oldukça yüksektir.



Şekil 1.3. Otomobillerde alüminyum alaşımlarının potansiyel uygulamaları.

Alüminyum alaşımlarının diğer metallere göre birçok alanda avantajlı kılan en önemli ana özelliklerini sıralarsak: 1. Hafifliği, 2. Hafifliğine karşın alaşımlandırıldığında yeterli mukavemeti, 3.Yüksek geri dönüşüm kabiliyeti, 4.Yüksek korozyon direnci, 5. Çekilebilirliği, 6. Kolay şekillendirilebilirliği, 7. Yüksek dövülebilirliği, 8. Kolay işlenebilirliği, 9. Yüksek ısı ve elektriksel iletkenliği, 10. Işık ve ısı yansıtıcılığı olarak sıralayabiliriz [1-4].

Alüminyum normal atmosfer koşullarında oksijen ile reaksiyona girerek kendi yüzeyinde doğal bir koruyucu film tabakası oluşturur. Alümina (Al_2O_3) tabakası alüminyum yüzeyini korozyona karşı korumaktadır. Bunun yanında alüminyum yüzeylere korozyon ve aşınma direncini artırmak farklı koruyucu kaplamalar ve/veya boyalar da rahatlıkla uygulanabilmektedir.



BÖLÜM 2. JANT ALAŞIMLARI VE TEKNİK ÖZELLİKLERİ

2.1. Jant Sektörü Analizi

Dünyada alüminyum jant sektörü 2012 yılında 12.9 Milyar\$ seviyesindeyken 2013 yılında 13.7 Milyar \$'a ulaşmıştır. 2012-2016 yılları arasında büyüme hızının ortalama %8.48 oranında olması beklenmektedir. 2012 yılı sonunda Çin'nin tek başına yılda 180 milyon adet üretim kapasitesine yaklaştığı ve satış hacminin ise 120 milyon adetlerde (>4.5 Milyar \$) olduğu gözlenmektedir. Bu kapasitenin 75 milyonu deniz aşırı ülkelere ihraç edilmiştir [5].

Bu hızlı büyüme karşısında avrupalı üreticiler de atağa kalkmıştır. Avrupanın önde jant üreticisi konumunda olan Almanya 2.5 Milyar \$ pazar payına sahiptir. Türkiye ise Almaya'nın ardından 2. olma hedefini sürdürmektedir. Türkiye toplamda yaklaşık 15 milyon adet/yıl kapasiteyle Avrupa'nın en büyük alüminyum jant üreticilerinden biri haline gelmiştir. Sektörün önde gelen otomotiv üreticilerinin önemli oranda jant ihtiyacına cevap vermektedir. Özellikle Ege bölgesi (İzmir, Manisa, Aydın), jant üretiminin yoğunlaştığı bir merkez konumuna gelmiştir [6-7]. CMS firması sektörün önde gelen üreticilerinden bir tanesidir. 2013 yılı verilerine göre 7.5 milyon adet jant üretimi 2015 yılında ise 10 milyon jant hedefi (≈ 500 Milyon \$) ön görülmektedir [7].

2012'de %95 kapasiteyle üretim yapan ülkemiz yerli jant üreticileri, ürettikleri jantların % 80'nini orjinal parça üreticilerine ihraç etmektedir. Yerli üreticiler Renault, Fiat, VW, Peugeot, BMW, Bentley, Audi, Mercedes gibi markalar başta olmak üzere hemen hemen tüm markalara jant ihracatı yapmaktadır. Son yıllarda Avrupa'da kapanan veya yaşlanan dökümhanelerin sayısının artması ve döviz kuru avantajı nedeniyle üretim ülkemize kaymış durumda olup, bu durum yerli alüminyum döküm sektörünün rekabet gücüne olumlu yansımaktadır. Artan talepler ile birlikte ülkemizde

alüminyum basınçlı döküm (metal enjeksiyon) firmalarına yoğun bir ilgi söz konusudur. Sonuç olarak Türkiye, alüminyum dökümde özellikle Avrupalı otomotiv üreticileri için önemli avantajlara sahiptir [6].

2.2. Jant Alaşımları ve Metalurjik Özellikleri

Jant öncelikle aracın tasarım ve estetik özelliklerini öne çıkaran parçalardan bir tanesidir. Çok farklı tasarımlar mevcut olup kullanıcıların beğenisine sunulmaktadır (Şekil 3.1.). Jantın ağırlığı, ölçüleri, konstrüksiyonu ve tasarımında yapılan değişiklikler, otomobillerin performansını ve yol tutuşunu önemli ölçüde artırmaktadır. Otomobilin motor gücü, ağırlığı ve büyüklüğü, jant ölçülerinin belirlenmesinde büyük rol oynamaktadır. Küçük sınıf araçlar için 12 inçten başlayan jant çapı, büyük ve yüksek performanslı otomobillerde 20 inç kadar çıkabilmektedir. Çelik (7.8 gr/cm³) ve hafif alaşımlı (alüminyum, magnezyum alaşımı) olmak üzere iki gruba ayrılan jant malzemelerinin önemli bir bölümünü alüminyum döküm alaşımı jantlar oluşturmaktadır [10-13].

Alüminyum alaşımlarının başlıca tercih nedeni alaşımın hafifliği (2.7 gr/cm³), mekanik dayanımı, yüksek spesifik mukavemeti, tasarım esnekliği, yüzey özellikleri, korozyon direnci, işlenebilme ve döküm kabiliyetidir [8,9]. Son yıllarda magnezyum alaşımı (düşük yoğunluğa 1.7 gr/cm³ sahip olması nedeniyle) jantlar üzerinde de araştırma çalışmalarında yoğunlaşmalar gözlenmektedir [10, 11].



Şekil 2.1. Farklı marka araçlar için alüminyum alaşımı jant tasarımları.

2.2.1. Alüminyum döküm alaşımlarının sınıflandırılması

Döküm alaşımlarının sınıflandırılması ve isimlendirilmesi kimyasal kompozisyonlarına göre yapılmaktadır. Tablo 2.1.'de görülebileceği üzere alüminyum alaşımların sınıflandırılmasında uluslararası olarak kabul edilen sınıflandırma U.S. Aluminium Association tarafından belirli kurallara göre yapılmaktadır. Döküm alaşımları için nümerik dizi; 3 tane rakam ve noktadan sonra 1 tane daha rakamla (XXX.X) tanımlanmaktadır. İlk rakam alaşıma ilave edilen alaşım elementi türüne göre veya saf alaşım olma durumuna göre tanımlanmaktadır. Örneğin 1XX.X serisi saf alüminyum, 2XX.X serisi ise Al-Cu alaşımları grubunu temsil etmektedir. Bu sınıflandırmaya göre alüminyum jant üretiminde yoğun olarak kullanılan alaşım A356.0 alaşım türüdür [12].

Tablo 2.1. Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırma kodları [12].

Sınıflandırma	Temel Alaşım Elementleri	Isıl işlem kabiliyeti
1xx.x	Alaşımlandırılmamış Alüminyum (% 99.0 veya daha yüksek safiyet)	Var
2xx.x	Bakır (Cu)	Var
3xx.x	Silis ile Magnezyum ve/veya Bakır	Var
4xx.x	Silisyum (Si)	Yok
5xx.x	Magnezyum (Mg)	Yok
7xx.x	Çinko (Zn)	Var
8xx.x	Kalay (Sn)	Var
9xx.x	Diğer elementler	-

2xx.x, 3xx.x, 4xx.x ve 7xx.x serileri ısıtılma uygun alaşımlardır. Sınıflandırma sisteminde 1xx.x grubunda noktanın solundaki iki rakam alaşım kompozisyonunda alüminyum içeriğini belirtmektedir. 2xx.x'den 9xx.x grubuna kadar olan aralıkta noktanın solundaki iki rakam sadece grup içerisindeki alaşımları ayırt etmek için kullanılmakta olup özel bir anlam taşımamaktadır. Örneğin 190.x dizilimi %99.90 saflığındaki alüminyumunu ifade etmektedir. Aynı grupta noktadan sonraki hane ürün şeklini nitelendirmektedir. Bu dizilimde 0 dökümler için 1.ve 2. külçeler içindir [12].

Uluslararası standartlar doğrultusunda döküm alüminyum alaşımları belirtildiği gibi 9 seride sınıflandırılmış olup farklı kompozisyonları kapsamaktadır. Kapsamın geniş olması teknik ihtiyaçlardan doğmaktadır; kodlamada en başa harf konularak farklılıklar belirtilmektedir. Örneğin 356.0 ve A356.0 gibi burada A alaşımdaki empürite farklılığını ve sınırlamasını işaret etmektedir. Jant üretiminde kullanılan A356 alaşımı (AlSi7Mg0.3) yaygın kullanılan alaşım kompozisyonu Tablo 2.2.'de sergilenmektedir.

Tablo 2.2. Alüminyum döküm alaşımlarının kimyasal bileşimleri [12].

Alaşım	Elementler					
	Si	Cu	Mg	Fe	Zn	Diğer
319.0	5,5-6,0	3,0-4,0	0,10	1,0	1,0	
332.0	8,5-10,5	2,0-4,0	0,5-1,5	1,2	1,0	
355.0	4,5-5,5	1,0-1,5	0,40-0,6	0,06	0,35	
A356.0	6,5-7,6	<0,20	0,25-0,45	<0,2	<0,1	
A357.0	6,5-7,5	0,05	0,45-0,6	0,15	0,05	0,05 Be
359.0	8,5-9,5	0,2	0,50-0,7	0,20	0,10	0,05
383.0	10,0	2,5	0,10	1,3	3,0	0,15 Sn
443.0	4,5-6,0	0,6	0,05	0,8	0,5	
707.0	0,20	0,2	1,8-2,4	0,20	<0,1	0,40Mn
850	0,70	0,7-1,3	0,10	0,7	-	
852.0	0,40	1,7-2,3	0,6-0,9	0,7	-	5,5 Sn
Elementin Etkisi	Akıcılık ↑	Sertlik↑	Korozyon	Sıcak	Akıcılık↑	Mn: tane
	Çekme	Muk.↑	direnci ↑	çatlama		küçült↑
	Dayanım ↑			direnci↑		

Al-Si-Mg alaşımlarının mekanik özellikleri, döküm kabiliyetleri, yüzey özellikleri, işlenebilme kabiliyetleri ve korozyon kabiliyetleri alaşım kompozisyonu ile doğrudan ilişkilidir. Kompozisyonunda Si içeriği döküm özelliklerini (akışkanlık, sıcak çatlama gibi) kontrol ederken, Mg içeriği mekanik dayanım özelliklerini ve korozyon direncini iyileştirmektedir. 356 alaşımı otomotiv uygulamalarında transmiyon kutularında, yağ pompası gövdelerinde, motor bloklarında ve jant uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. A356 alaşımı, 356 alaşımına göre üstün mekanik dayanım ve tokluk özellikleri sergilemektedir. Bunun nedeni; alaşım kompozisyonunda empürite seviyesi A356 alaşımında önemli ölçüde sınırlandırılmıştır. T6 ısıtıl işlemi ile mekanik özellikleri artırılabilir. [12].

Al-Si-Mg alaşımlarının mekanik özellikleri, döküm kabiliyetleri, yüzey özellikleri, işlenebilme kabiliyetleri ve korozyon kabiliyetleri alaşım kompozisyonu ile doğrudan ilişkilidir.

Kompozisyonunda Si içeriği döküm özelliklerini (akışkanlık, sıcak çatlama gibi) kontrol ederken, Mg içeriği mekanik dayanım özelliklerini ve korozyon direncini iyileştirmektedir. 356 alaşımı otomotiv uygulamalarında transmiyon kutularında, yağ pompası gövdelerinde, motor bloklarında ve jant uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. A356 alaşımının üretiminde farklı döküm yöntemleri ve toz metalurjik prosesler gerçekleştirilebilmektedir (Tablo 2.3.). Ve sonrasında A356, A360, A380 alüminyum alaşımlarının fiziksel özellikleri Tablo 2.4.'de gösterilmiştir. Döküm sonrası yaşlandırma ısı işlemi ile mekanik özellikleri önemli ölçüde artırılabilir [12].

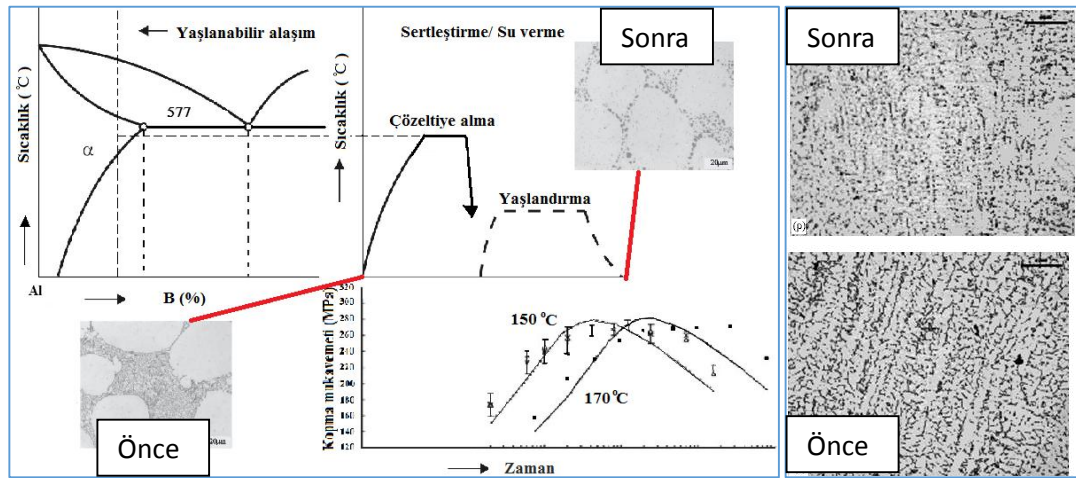
Tablo 2.3. A356 döküm alaşımlarının mekanik özellikleri[15,16].

Alaşım	Döküm yöntemi	Çekme mukavemeti	Akma mukavemeti	% Uzama	Sertlik
356-T5	Yarı-Katı Döküm	234	172	11	89 HV
356-T6	Yarı-Katı Döküm	296	193	12	90 HV
A356-T6	Sıcak İzostatik Pres	248	172	6.7	-
A356-T6	İzostatik Pres	193	138	5.4	-
356-T6	Kum Kalıba Döküm	227.5	165.5	8.9	70HB
A356-T6	Kum Kalıba Döküm	275.8	206.0	15.2	-
A356	Basınçlı döküm	220±15	165±10	2-7	20 HR _A
A356-T6		250±20	200±10	2-5	32 HR _A

Tablo 2.4. A356,A360,A380 Alüminyum alaşımlarının fiziksel özellikleri [15].

Özellik / Alaşım	A356	A360	A380
Yoğunluk (g/cm ³)	2.67	2.68	2.76
Isı Kapasitesi (J/g K)	0.963	0.963	0.963
Termal iletkenlik (W/m K)	151	113	109
Ergime Aralığı (°C)	557-613	557-596	538-593
Çekme mukavemeti (MPa)	234	317	324
Akma mukavemeti (MPa)	165	165	159
% Uzama	3.5	3.5	3.5

Yaşlandırma ısısal işlemi temel olarak üç kademeden oluşmaktadır, bunlar sırasıyla; çözeltiye alma, su verme ve çökelme (yaşlandırma) işlemidir. Aşırı doymuş katı fazdan yaşlanma işlemi sonucunda yapıda çok ince çökeltilerin oluşumu mekanik özelliklerin iyileştirilmesine yardımcı olmaktadır (Şekil 2.2.). Bu çökeltilerin oluşumu, doğal olarak gerçekleşebileceği gibi yapay olarak da yapılabilmektedir. Genellikle proses hızı nedeniyle yapay yaşlandırma işlemi tercih edilmektedir. Belirli alüminyum alaşımlarında uygulanan ısısal işlem sınıflandırması Tablo 2.5.'de sergilenmektedir. Isıl işlem tanımlamaları 0, T4, T5, T6 gibi kodlamalar yapılmaktadır. Jant alaşımları için en çok tercih edilen ısısal işlem T6 işlemidir (530 °C/ 6 saat çözeltiye alma+ su verme+ yapay yaşlandırma 145 °C/ 6 saat) [14-17].



Şekil 2.2. AlSi alaşımlarına T6 ısısal işlemi öncesi ve sonrası mikro yapı [14,18].

Alüminyum alaşım jant üretiminde de kullanılan yaşlandırma ile sertleştirilebilen ve magnezyum içeren Al – Si alaşımları önemli bir alaşım grubunu oluşturmaktadır. Ancak bu alaşımlar, döküm parçasında çekme mukavemetine etkiyen Mg_2Si fazının oluşması sebebiyle % 0,45 civarında magnezyum oranı ile sınırlanmaktadır. Çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma aşamalarını içeren ısıtıl işlem prosesi Mg_2Si fazının düzenli bir şekilde alüminyum dendritleri arasında çökmesini sağlayarak bu sorun çözülmektedir.

Tablo 2.5. Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıtıl işlemler ve kodları (EN1706) [14-16].

Temper	Açıklama
F	Mekanik veya ısıtıl işlem görmemiş halde
O	Tavlanmış ve yeniden kristalleşmiş
H1x	Soğuk işlem uygulanmış
H2x	Soğuk işlenmiş ve kısmen tavlanmış(x. Farklı sertlikleri ifade etmektedir.)
H	H3x Sadece soğuk işlem uygulanmış ve kararlı
H4x	Soğuk işlem uygulanmış ve malzeme yaşlanmaması için düşük sıcaklıkta ısıtıl işlemde stabilize edilmiş(x. Stabilizasyon sonrası sertleşme işlemini ifade eder.)
W	Yaşlandırma işlemini göstermektedir
T1	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş ve doğal yaşlandırılmış
T2	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış
T3	Çözeltiye alınmış soğuk işlenmiş ve doğal yaşlandırma uygulanmıştır
T4	Çözeltiye alınmış ve doğal yaşlandırılmış
T	T5 Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş ve yapay yaşlandırılmış
T6	Çözeltiye alınmış ve yapay yaşlandırılmış
T7	Çözeltiye alınmış ve stabilize edilmiş (Aşırı yaşlanmış)
T8	Çözeltiye alınmış soğuk şekillenmiş ve yapay yaşlandırılmış
T9	Çözeltiye alınmış yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlem uygulanmış
T10	Sıcak şekillenme sonrası soğumuş soğuk işlem uygulanmış ve yapay yaşlandırılmış

Jant alaşımı olarak alüminyum alaşımları arasında özellikleri karşılaştırdığımızda A356 alaşımı döküm kabiliyeti, mekanik özellikleri ve korozyon direnci nedeniyle

üstün performans sağlamaktadır [17,18]. Tablo 2.6.'da farklı alaşım kompozisyonları ve özellikleri karşılaştırılmaktadır.

Tablo 2.6. Uygun Jant Alaşımının Seçimi [12].

Alaşım	Yırtılma Direnci	Mekanik Dayanımı	Akışkanlık	Çekinti Eğilimi	Korozyon Direnci	İşlenebilirlik
319.0	2	2	2	2	3	3
332.0	1	2	1	2	3	4
355.0	1	1	1	1	3	3
A356.0	1	1	2	1	2	3
A357.0	1	1	1	1	2	3
359.0	2	1	2	-	5	3
443.0	1	1	2	1	2	5
(Değerlendirme : 1, en iyi ; 5, en kötü)						

Jant alaşımlarından beklenen özellikler:

- Rijitlik
- Akma/Çekme mukavemeti
- Sertlik
- Isıl direnç/stabilite
- Yorulma direnci/ ömrü
- Korozyon direnci (atmosferik şartlara)
- Darbe dayanımı
- Spesifik mukavemet
- Döküm kabiliyeti
- Talaşlı işlem kabiliyeti
- Seri üretim kabiliyeti
- Yüzey işlem kabiliyeti (boya, kaplama vb.)

2.3. Jant Üretiminde Kullanılan Üretim Yöntemleri

1940'ların sonuna doğru alüminyum alaşımlarından jant üretimi başlamıştır. İlk jant üretiminde alaşım bloklar dövme yöntemi ile şekillendirilmiş sonrasında talaşlı imalat ile son ürün şekli kazandırılmıştır (Şekil 2.3.). Mekanik özellikleri açısından dövme yöntemi ile üretilen jantlar döküm yöntemi ile üretilen jantlara göre üstün performans

sergilemesine karşın gerek üretim zorlukları ve yüksek üretim maliyetleri sınırlayıcı etken olmuştur.



Şekil 2.3. Dövme ile jant üretimi işlem basamakları.

Artan otomotiv üretimi ve jant ihtiyacı seri üretime daha uygun ve ekonomik üretim yöntemlerini zorunlu olarak karşımıza çıkarmıştır. Bu bağlamda kum kalıba döküm teknolojisi ile jant dökümü gerçekleştirilmiştir. Bozunur kum kalıplarda döküm yöntemleri gerek uygulama pratikliği (her defasında kalıplama gereksinimi gibi) açısından gerekse mekanik özellikler açısından avantaj sağlamasına karşın kötü yüzey kalitesi nedeniyle ek talaşlı işlem maliyetleri ve çevre dostu olmayan üretim şartları yanında sınırlı üretim hızı nedeniyle sınırlanmıştır (Şekil 2.4.).



Şekil 2.4. Kum kalıba döküm yöntemi ile jant üretimi.

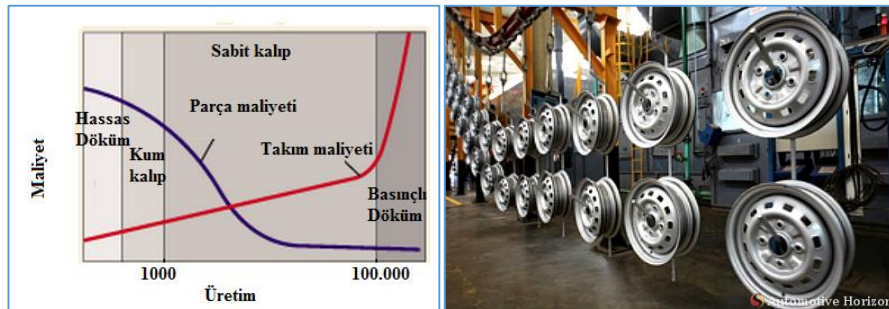
Seri üretim kapasitesini ve hızını artırmak amacıyla bozunmayan metal kalıba enjeksiyon (basıncılı döküm) döküm yöntemi ile jant üretim prosesleri ön plana çıkmıştır. Günümüzde yaygın olarak jant dökümünde düşük basınçlı alüminyum döküm tekniğinden yararlanılmaktadır. Basıncılı döküm proseslerinin gelişimi jant

sektöründe önemli bir ivme oluşturmuştur (Şekil 2.5.). Daha fazla jant seri halde ekonomik olarak talaşlı imalata gereksinim duyulmaksızın üretilmeye başlanmıştır.



Şekil 2.5. Düşük basınçlı döküm yöntemi ile seri halde jant üretimi.

Şekil 2.6.'da farklı döküm proseslerinin ekonomik ve üretim kapasiteleri karşılaştırılmaktadır. Görüleceği üzere hassas döküm ve kum kalıba döküm yöntemlerinde üretim kapasitesi sınırlı olup işlem süreleri oldukça uzundur. Hassas döküm prosesi, kum kalıba döküm prosesine göre yüksek maliyetler ortaya koymaktadır. Bunun yanında boyut tolerans hassasiyeti oldukça yüksektir. Kum kalıba döküm parçalarda yüzey kalitesi oldukça düşük olup bu nedenle ek yüzey işlemlere gereksinim artmaktadır. Sabit bozunmayan kalıp kullanımında parça üretim adedi artması durumunda birim üretim maliyetleri düşmektedir. Buna karşın kalıbın ömrü üretim kapasitesini belirlemektedir. Bu nedenle yüksek kapasiteli üretimler için kalıp maliyetleri oldukça yükselmektedir. Özellikle jant üretiminde de üretim kapasitesi doğrudan kalıp performansı ve ömrü ile sınırlıdır.

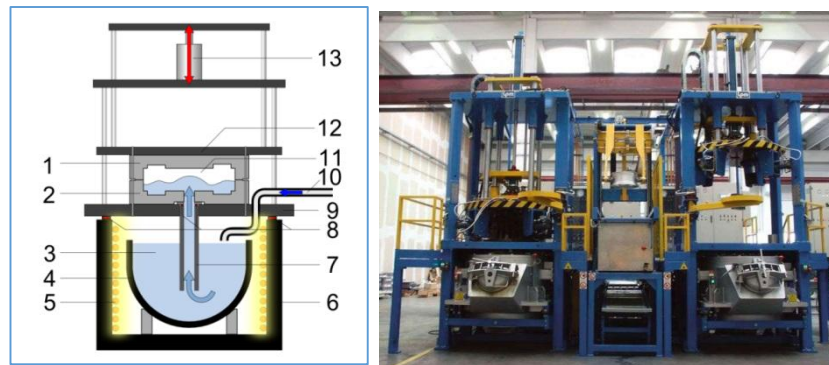


Şekil 2.6. Döküm Proseslerinin Ekonomik Ve Seri Üretim Açısından Karşılaştırması.

BÖLÜM 3. DÜŞÜK BASINÇLI ALÜMİNYUM DÖKÜM PROSESİ

3.1. Giriş

Düşük basınçlı döküm prosesiyle (Low Pressure Die Casting; LPDC) alüminyum jant üretimi, yüksek fayda/maliyet oranına sahip üretim yöntemlerindenn bir tanesidir [19,20]. Tipik bir LPDC makinesinin (Şekil 3.1.) altında elektrikle ısıtılan bir fırın ve içerisinde ergimiş alüminyum ihtiva eden bir pota bulunmaktadır. Sıvı metal aşağıdan yukarı doğru yerçekimi kuvveti veya düşük basınç etkisiyle kalıbın içerisine yavaş ve kontrollü bir şekilde enjekte edilmektedir. Düşük basınçlı döküm makinası şekilde görüldüğü üzere şu bileşenlerden oluştuğunu söyleyebiliriz (1-Metalik üst kalıp, 2-Metalik alt kalıp, 3-Eriyik metal, 4-Pota, 5-Isıtıcı, 6-Fırın, 7-Eriyik besleme borusu, 8-Kalıp destekleri, 9-Kalıp alt tablası, 10-Basınç, 11-Kalıp boşluğu, 12-Kalıp üst tabla, 13-Hidrolik silindir.) Bir kaç parçadan oluşan kalıp ile sıvı metal etkileşimi esnasında ısı transferi başlamaktadır. Kalıp içerisinde sıvı metalin katılaşması ve kalıbın açılarak parçanın çıkarılması ile çevrim tamamlanmaktadır. Tipik bir çevrim 5-6 dakika sürede tamamlanmaktadır.



Şekil 3.1. Düşük basınçlı döküm prosesi ve döküm makinası.

3.2. Döküm İşlemi Ve Parametreleri

A356 alüminyum alaşımından (Hipo-ötektik Al-Si alaşımı) jant döküm parçalarının üretiminde ingotlar halinde alaşımlar ergitme işleminde kullanılmaktadır. Elektrik indüksiyon ocaklarında 750 ± 5 °C ergitilen alaşımlar eriyik (sıvı metal) hale geçmektedir (Şekil 3.2.). Eriyik içerisinde gaz kabarcıklarının giderilmesi amacıyla gaz giderme işleminde azot gazı ve Sr içeren master alaşımlar kullanılmaktadır. $AlTi_5B_1$ çubuk şeklinde tane incelticiler kullanılarak döküm mikroyapısının mekanik özellikleri artırılmaktadır [21-24].



Şekil 3.2. Alüminyum jant döküm sistemi.

Tipik bir döküm çevriminde; ocakta hazır bekleyen eriyiğin yüzeyinin basınçlandırılmasıyla potanın içerisindeki besleyici borudan sıvı metalin yükselmesi ile kalıp boşluğuna eriyiğin dolması sağlanmaktadır. Döküm çevrimi yaklaşık 300 ± 5 sn (5-6 dakika) sürede tamamlanmaktadır. Bir çevrim 5 adımdan oluşmaktadır [24]:

1. Adım: kalıbın eriyik ile dolması 60 ± 4 sn, basınç: 0.4 ± 0.014 bar,
2. Adım :dolum süresi 210 ± 5 sn, dolum hızı: 30-70 mm/sn; dolum sonrası kilitleme basıncı: 2 ± 0.03 bar 10 ± 2 sn bekleme,
3. Adım: fırın basıncının boşaltılması 5 ± 1 sn;

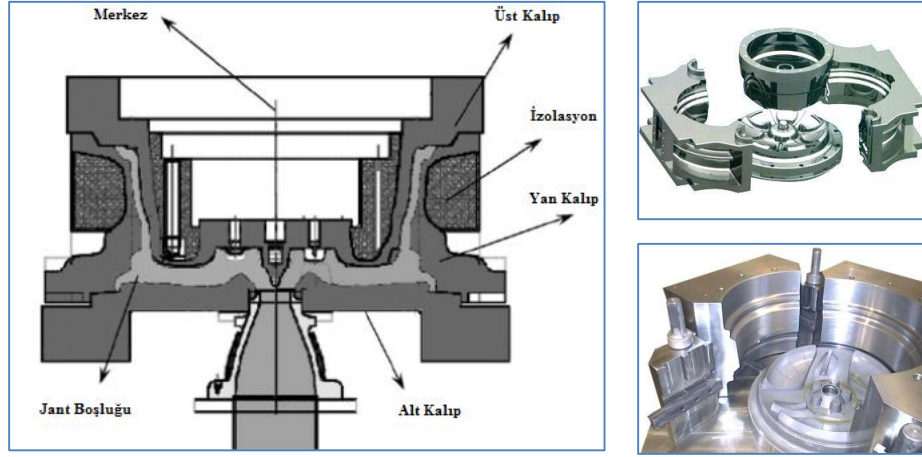
4. Adım : katılaşma sonrası yan kalıp açılması 5 ± 1 sn, üst kalıp yukarı çıkartılıyor 10 ± 1 sn, döküm jant kalıptan çıkarılıyor 5 ± 1 sn,
5. Adım: kalıbın kapatılması ve yeni çevrim başlangıcı.

Katılaşma esnasında soğuma hızı alt ve üst kalıp içi kanalcıklarda 2-3 bar basınçlı hava aracılığıyla farklı sürelerde sağlanmaktadır. Yan kalıplarda soğutma hava jetleri aracılığıyla harici yüzeyden gerçekleştirilmektedir. Farklı kalıp geometrilerine rağmen jant döküm çevrimi benzer şekilde gerçekleştirilmektedir. Kalıptan çıkarılmış parçalar çözeltiye alma ısısal işlemine tabi tutulur ($540\text{ }^{\circ}\text{C}/ 6$ saat) ardından sıcak su banyosunda ($80\text{ }^{\circ}\text{C}/ 20$ sn) soğutulur ve sonrasında yapay yaşlandırılarak ($160^{\circ}\text{C}/ 5$ saat) nihai mekanik dayanım kazandırılmaktadır [24].

3.3. Döküm Kalıpları Ve Kalıp Malzemeleri

Düşük basınçlı döküm prosesinde kalıplar alt, üst ve yan kalıp olmak üzere farklı parçalardan oluşmaktadır. Ürünün karmaşıklık seviyesine bağlı olarak kalıp tasarımları ve kalıp bileşenleri farklılaşmaktadır. Şekil 3.3.'de tipik bir jant kalıp kesiti sergilenmektedir. Kalıp malzemesi olarak özellikle yüksek sıcaklıklarda aşınma dayanımı yüksek, sıcak iş kalıp çelikleri tercih edilmektedir. Alt ve üst kalıplarda genellikle AISI H13 (1.2344) tipi çelikler ($\text{HRC}:45-55$) kullanılmaktadır. Bunun yanında yan kalıplarda ise dökme demir kullanılmaktadır. Kalıpların üst ve yanak kısımlarına ısısal kontrolü sağlamak amacıyla poteyaj (silika esaslı) yalıtım kaplamaları uygulanmaktadır [22-24].

Eriyik metalin kalıp ile temas etmesinden itibaren katılaşma hızını kontrol eden bir ısı transferi söz konusudur. Kalıp alaşımının türüne bağlı olarak ısı transferi ve katılaşma hızı değişmektedir. Katılaşma hızını kontrol etmek amacıyla kalıplara ısıya dayanıklı refrakter esaslı kaplamalar uygulanmaktadır. Ticari adı poteyaj olarak tanımlanan bu kaplamalar sıvı metal ile kalıp ara yüzeyinde ısısal kontrol sağlamaktadır. Tablo 3.1.'de kalıp malzemelerinin sıcaklığa bağlı olarak değişen termo fiziksel özellikleri sergilenmektedir [22-24].



Şekil 3.3. Düşük basınçlı jant döküm kalıbı kesiti [22], ve Kalıp bileşenleri.

Kalıp yüzeylerinde poteyaj kaplamanın hasar görmesi veya görevini yerine getirememesi katılaşma nedenli döküm hatalarına yol açmaktadır. Hasar görmüş veya yeterli ısı kontrolü sağlayamayan poteyaj kaplama işlemi kalıbın sökülmesi, ayrılması (Şekil 3.3.) ve yeniden poteyajlama işleminin tekrarlanması zorunlu kılmaktadır.

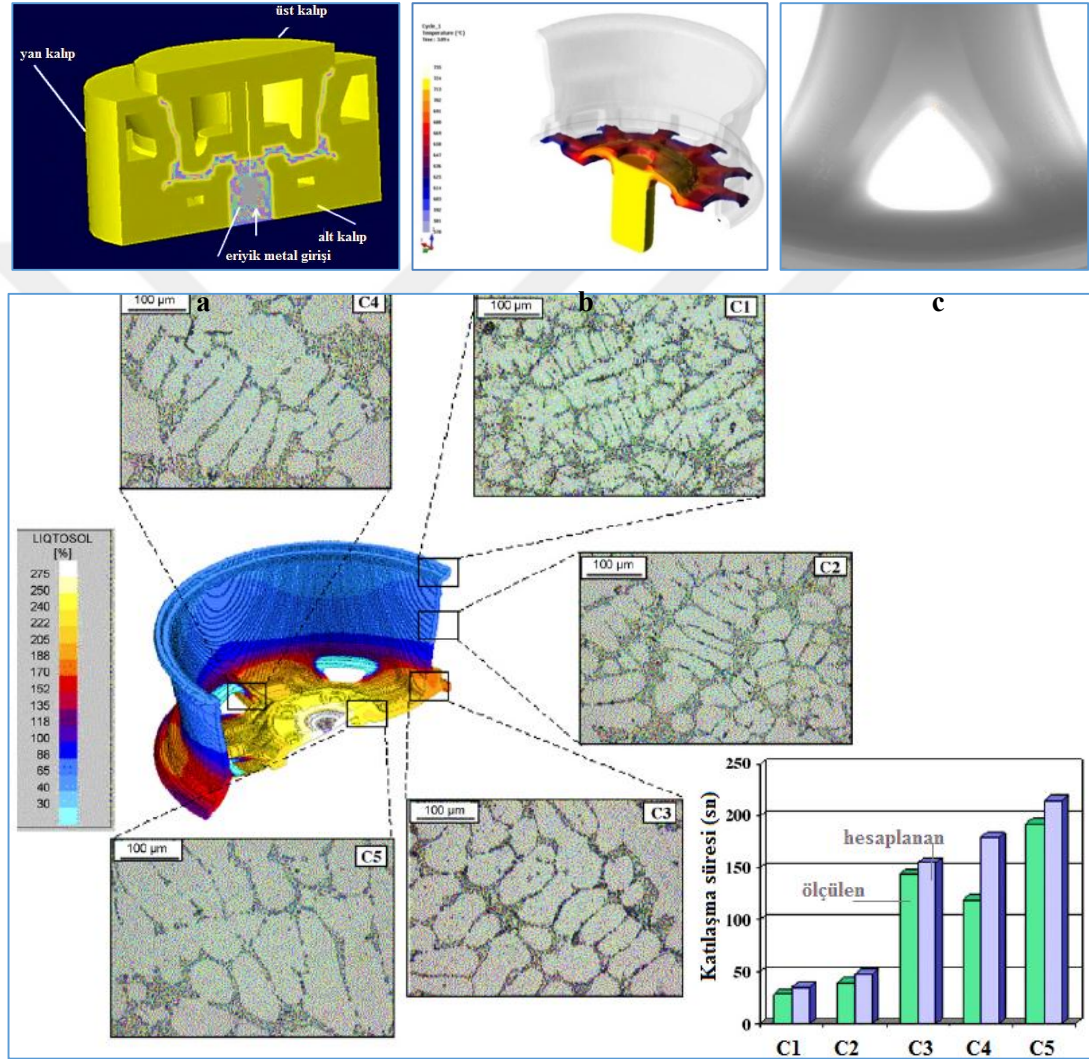
Poteyaj kaplama uygulanmadığı takdirde belirli bir çevrim sonrasında kalıp çeliğinde eriyik metal korozyonu ve aşınması nedenli problemler artmakta bunun yanı sıra sıvı metalin yüzeylere lehimlenmesi gibi hasar türleriyle karşılaşmaktadır. Dolayısıyla kalıp ömrü poteyaj kaplamanın dayanımı ve performansı ile doğrudan ilişkilidir. Kalıp ömrüne ve poteyaj kaplamanın performansına bağlı olarak katılaşma hasarları ve/ya kalıp hasarları nedenli fireler oluştuğunda üretim verimliliği önemli ölçüde düşmektedir.

Tablo 3.1. Kalıplarda kullanılan malzemelerin termo-fiziksel özellikleri [22].

Malzeme	Termal İletkenlik		Isı kapasitesi		Latent Isısı	Yoğunluk ρ (kg/m ³)
	T (°C)	k(W/m/K)	T(°C)	C _p (J/kg/K)	Sıcaklık aralığı (°C)	
A356	25	165	25	880	613.2>T≥610.7	2369
	100	165	100	921	610.7>T≥588.2	
	200	162	200	967	588.2>T≥567.2	
	300	155	300	1011	567.2>T≥563.6	
	380	153	400	1055		
	500	145	500	1098		
	567	134	567	1127		
	614	400*(65.8)	614	1190	-	
	700	400*(67.9)	>700	1190		
	800	400*(70.0)				
Dökme Demir	20	60.0	20	548		7300
	140	60.0	100	548		
	280	44.1	662	622		
	420	40.9	803	705	-	
	560	37.1	1100	746		
	700	33.6	1200	>916		
	840	28.1				
H13	20	24.60	23	458.8		7367
	200	26.25	200	518.5		
	500	27.30	400	587.8	-	
	600	27.76	600	726.2		
	800	28.07	700	905.4		
	850	28.39	760	1151.1		
İzalasyo n	25	1.34	0	821		2291
	260	1.34	100	900		
	538	1.45	200	969		
	816	1.54	300	1027	-	
			400	1075		
			500	1111		
			600	1137		

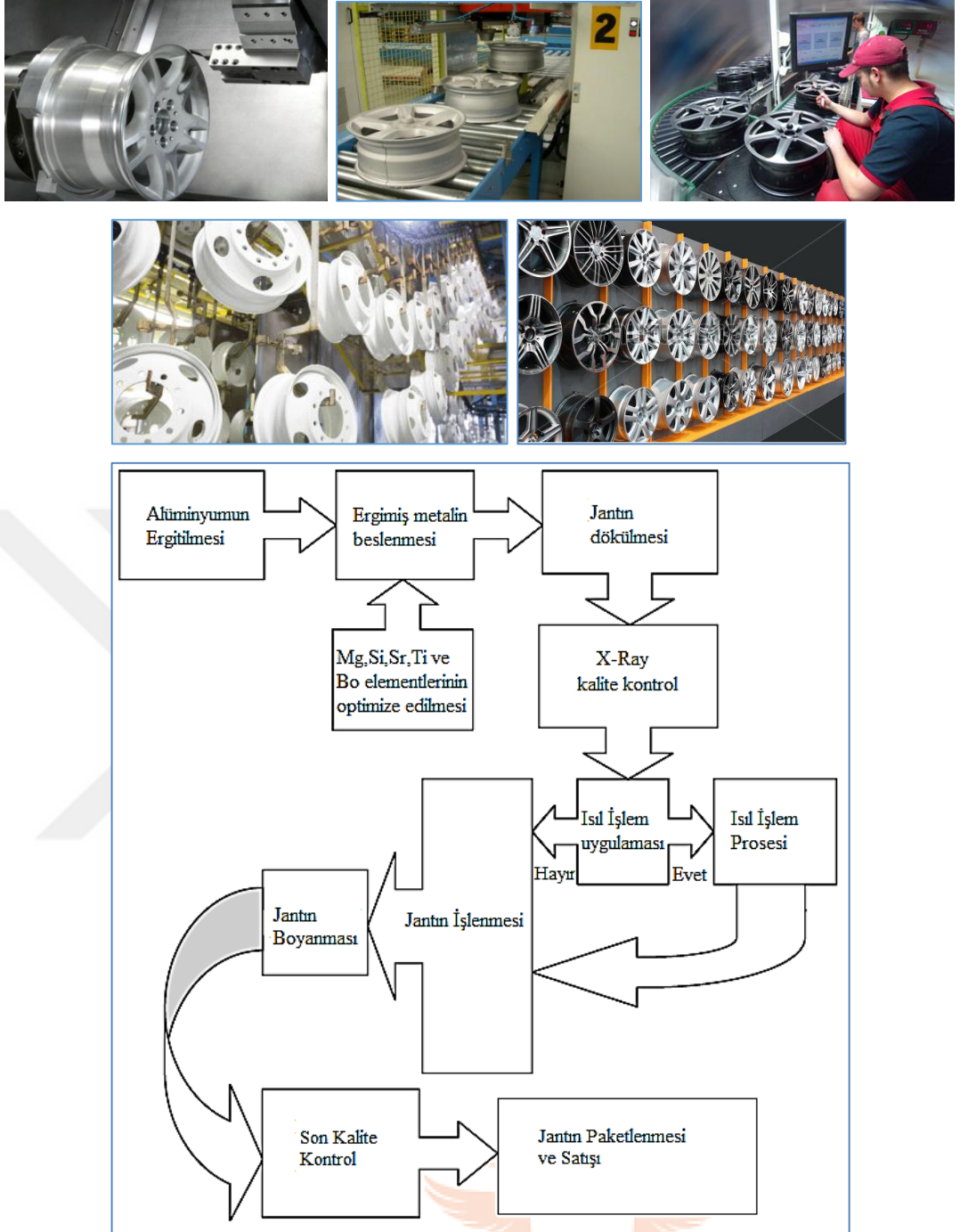
Düşük basınçlı döküm prosesi ile alüminyum alaşımı jant döküm parçaları (4-10 kg)'nın üretiminde kalıbın eriyik ile dolumu ve katılaşma davranışı döküm simülasyon programları ile ön analizlere tabi tutulmaktadır (Şekil 3.4.). Bunun yanında gerçek

zamanlı olarak kalıbın termal görüntüleri alınarak kalıbın sıcaklık profili ortaya çıkarılmaktadır. Burada önemli olan nokta kalıbın belirlenen çevrim kapsamında uygun şekilde tam olarak dolması ve yapısında gaz boşluğu, porozite, katlanma içermemesidir. Kalıbın merkezi en son katılaşılan bölgedir. Döküm kalitesini kontrol etmek amacıyla X-ışınları ile röntgen filmleri çekilmektedir [22].



Şekil 3.4. Eriyik metalin kalıba girişi, b) Kalıbın dolum simülasyonu c) röntgen filmi ve d) döküm mikroyapısı.

Kalite kontrol işleminden geçen jantlar son şekillerini almak için talaş kaldırma işlemine tabi tutulur. CNC cihazları ile rulman yatakları, bijon delikleri açılmaktadır. Ardından balans ayarları yapılarak boyahanede boya işlemi sonrası paketlenerek satışa hazır hale getirilmektedir (Şekil 3.5.) [22, 25].

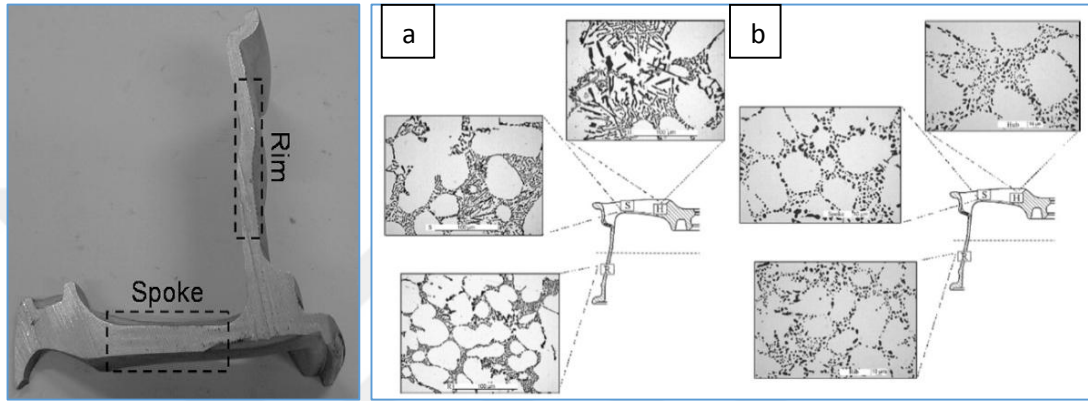


Şekil 3.5. Jant üretiminde iş akışı a) Döküm+ ısıtıl işlem sonrası talaşlı imalat, b) Kalite kontrol c)-d) Boya hattı ve stok [25].

3.4. Alüminyum Döküm Jant Alaşımlarının Metalurjik Özellikleri

A356 alüminyum döküm alaşımlarının mikroyapısında α -Al katı çözeltisi ve alüminyum-silisyum ötektik fazları gözlenmektedir. Eriyik fazından soğuma

esnasında α -Al çökelti fazlarının yapısı genellikle dentritiktir. Aynı zamanda mikroyapıda Fe-zengini intermetalik (β -Al₅SiFe) bileşiklerde gözlenebilmektedir. A356 alaşımının mekanik özellikleri yüksek katılaşma hızları ve daha düşük oranda Fe konsantrasyonu ile artırılabilir [21]. Jant döküm parçasının farklı bölgelerinden alınan numuneler incelendiğinde mikroyapılar Şekil 3.6.'da sergilenmektedir [24].

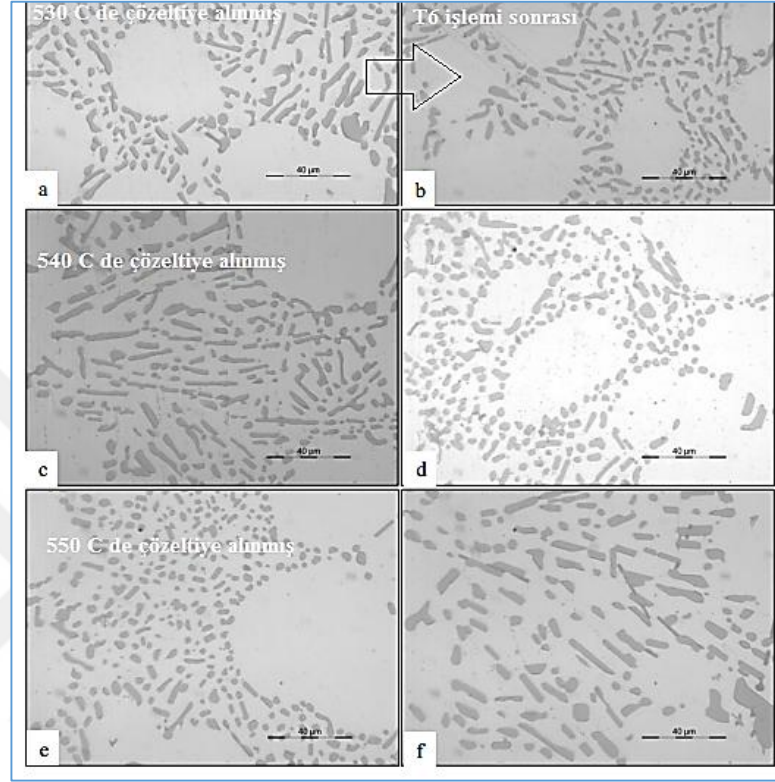


Şekil 3.6. a) Jant alaşımının farklı bölgelerinin mikroyapıları (S:Spoke, R: Rim, H:hub) döküm yapısı b) T6 ısıtım işlem sonrası yapı [24].

A356 alaşımlarının mekanik özellikleri (% uzama, akma-çekme mukavemeti, darbe dayanımı, yorulma ömrü): genellikle silisyum partiküllerin, Al-Si ötektik fazın, ve intermetalik fazın ortalama boyutu, şekli ve dağılımı yanı sıra dentritler arası mesafeye bağlı olarak kontrol edilmektedir. Bunun yanında çözeltiye alma ve yaşlandırma ısıtım işlem (T6) şartlarına, tane inceltici türü ve oranına bağlı olarak mikroyapıda partiküllerinin morfolojisi ve dentritler arası mesafe değişmektedir [25, 26].

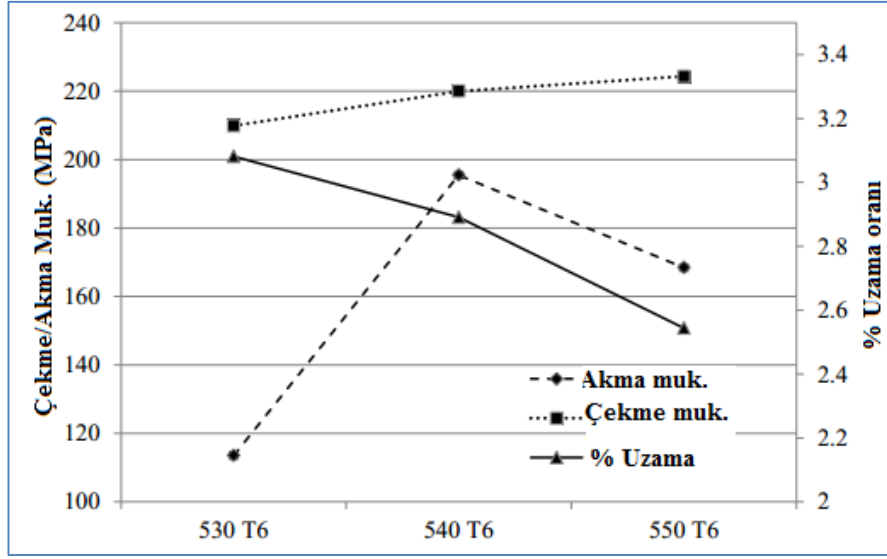
Si partikül morfolojisinin etkisi: T6 ısıtım işlemi kapsamında çözeltiye alma sıcaklığı artırıldığı (540-560 °C aralığında) takdirde T6 ısıtım işlemi öncesinde mikroyapıda küçük ve küresel formlarda silisyum parçacıkları gözlenmektedir [26]. En yüksek sertlik (döküm halinde:59HV→ çözeltiye alma sonrasında 87HV) değerlerine 550 °C çözeltiye alma işlemi sonrası mikroyapıda Si ortalama 20 μ m² yapay yaşlandırma sonrasında ise tane boyutu neredeyse 2 kat artmış ve gelişi güzel dağılım göstermiştir (Şekil 3.7. e, f.). Bunun sonucunda da sertlik seviyesi 105 HV seviyesinde sınırlı kalmıştır. 540 °C'de çözeltiye alınması sonucunda mikro yapıda küresel formda Si

parçacıkları oldukça küçük boyutlardadır ($18\mu\text{m}^2$). T6 ısıt işlem sonrasında (Şekil 3.7. c, d.) en yüksek çekme mukavemeti (220-230 MPa) ve sertlik (130 HV) seviyesine ulaşmıştır [26].



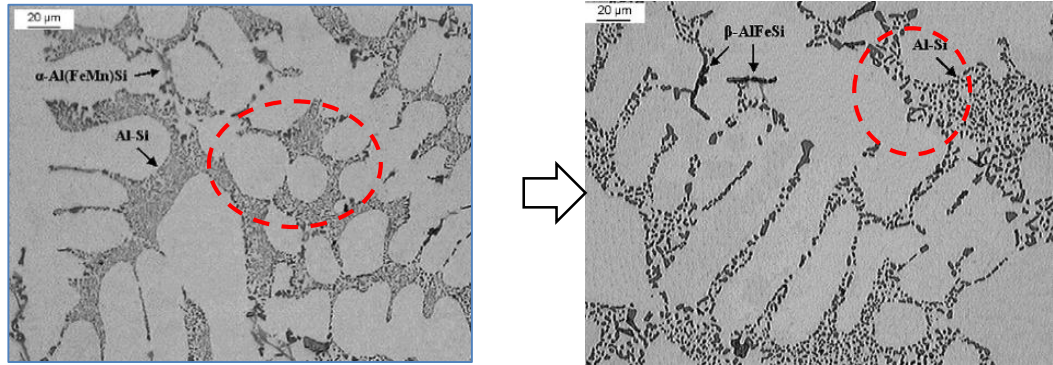
Şekil 3.7. Farklı çözeltiye alma sıcaklıklarının A356 mikroyapısında Si parçacıklarının morfolojisine T6 işlemi öncesi ve sonrası etkisi [26].

Şekil 3.8.'de A356 alaşımına uygulanan T6 ısıt işlem şartlarına bağlı olarak akma, çekme mukavemeti ile uzama oranının değişimi sergilenmektedir. Görüleceği üzere optimum proses şartları $540\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de çözeltiye alma işlemi sonrası T6 uygulanmış mikro yapı olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3.8. Çözeltiye alma sıcaklıklarının A356 alaşımının mekanik özelliklerine etkisi [26].

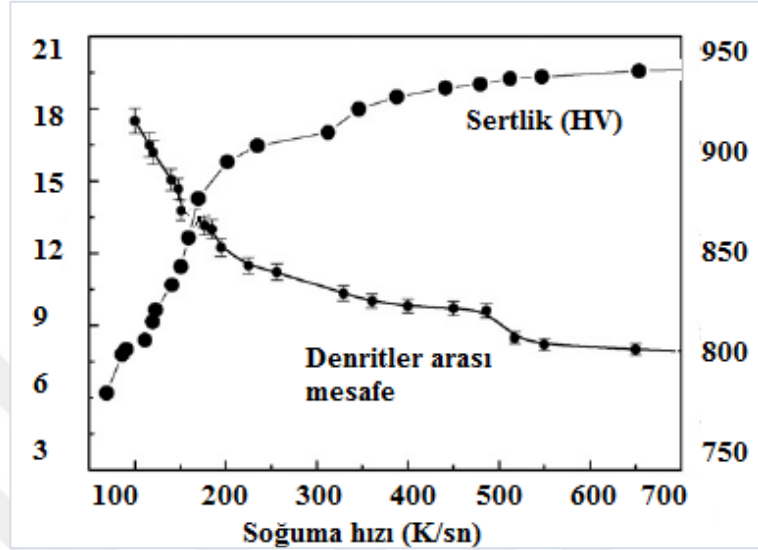
Al-Si ötektik yapısının etkisi: A356 alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini etkileyen bir diğer önemli faktör ise Al-Si ötektik yapısının morfolojisidir. Şekil 3.9.'da görüleceği üzere döküm halinde mikro yapı görüntüsünde çubuk formunda Al-Si ötektiğinin yapısı T6 ısıtıl işlemi sonrasında küresel formda ötektik yapıların oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum 1.5 J darbe dayanımına sahip döküm yapısının ısıtıl işlem sonrasında 2.5J darbe dayanımına yükselmektedir (%60 oranında artış)[24].



Şekil 3.9. Jant alaşımı mikroyapısında a. döküm yapısı çubuk şeklinde Al-Si ötektik yapı b. T6 ısıtıl işlem sonrasında küresel formda ötektik yapının optik mikroskop görüntüleri [24].

Dentirler arası mesafenin etkisi: Alaşım kompozisyonunda Fe içeriği dentirler arası mesafeyi kontrol etmektedir. Genel olarak mikroyapıda Fe empürileri mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir. A356/T6 alaşımlarında çekme mukavemeti ve

uzama oranı azalan denritler arası mesafeye bağlı olarak artış sergilemektedir. Bunun yanında soğuma hızı artışı Şekil 3.10.'da görüleceği üzere denritler arası mesafeyi daraltmaktadır [27, 28].



Şekil 3.10. Soğuma hızına bağlı denritler arası mesafe ve sertlik değişimi [28].

İkincil fazın etkisi **Çözeltiye alma** ısıtma işlemi esnasında katı ve sıvı fazlarda ikincil Mg_2Si fazı oluşmaktadır. Ayrıca silisyum partikülleri hızlı bir şekilde segragasyona uğrayacaktır bunun yanı sıra çözelti sırasında irileşmektedir. Silisyum partiküllerinin çekirdek büyüme hızı matris alaşımından daha yüksektir ve ısıtma işlemi ile segragasyona uğrayan silisyum partiküllerinin bir kısmı küçüktür. Akma dayanımı ısıtma işlemi sırasında nispeten etkilenmez. Çözeltiye alma sıcaklığı, çekme dayanımını çözeltiye alma süresinden daha fazla etki etmektedir. Kısa su verme zamanı ve oda sıcaklığı ortamında su verme gerilmeyi arttıracaktır. Alaşımda çözünmüş olan β' (Mg_2Si) G zonları yaşlanma sırasında çekirdeklenecektir ve mukavemet özelliklerini arttıracaktır.

Düşük su verme hızı etkisi: Çözeltiye alma işlemi sonrasında düşük su verme hızında ($60^\circ C$ sıcaklıktaki su), α -alüminyum matris içerisinde $170^\circ C$ gibi düşük yaşlandırma sıcaklıklarında 6 saat suni yaşlandırmada bile yüksek oranda silisyumun çökmesi gözlenmektedir.

Daha düşük su verme hızlarında (havada soğutma) ise aşırı silisyum difüzyonuna neden olmaktadır ve matris α -alüminyumun fazından çıkarak fazlaca $\alpha+\beta$ fazı oluşmaktadır.

170 °C’de suni yaşlandırılması ve yüksek su verme hızı (25 °C de soğuk suda soğutma) alüminyum fazının içine aşırı çekirdeklenmesine (sert pikin 6-10 saat sonra) neden olacaktır. Ötektik bölgede silisyum partiküllerinin oluşumu daha çok, dislakasyon içeren ötektik bölgelerden daha kolay oluşacaktır.

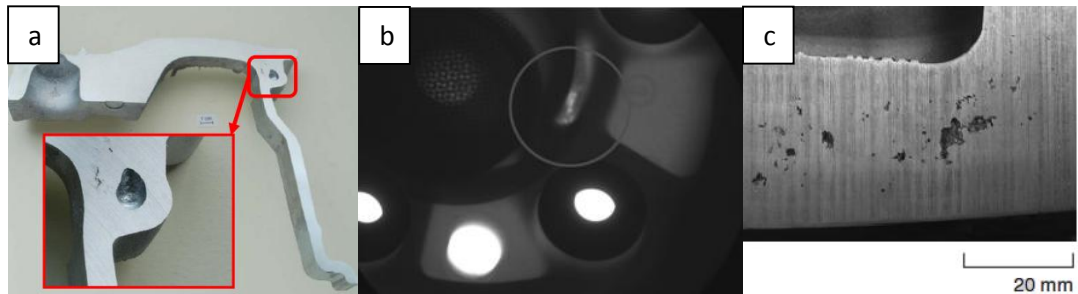
İntermetalik partiküllerin etkisi: İntermetalik partiküller ve demir içerikli alaşımların içerisindeki magnezyumun oranı ve çözeltiye alma işleminin parametreleri etkili olmaktadır. Düşük magnezyum alaşımı (%0.3-0.4) çoğu π -Al₈Mg₃FeSi₆ fazı dönüşerek β -Al₅FeSi fazı olarak iğnesel forma geçmektedir. Çözelti içerisindeki maksimum düzeyde magnezyum matrise yayılacaktır. Bu durum pekleşmenin oranında artış ve en yüksek akma mukavemeti sağlayacaktır. Yüksek magnezyum içeren alaşımlarda (%0.4-0.7) π fazı daha kararlıdır ve biraz dönüşüm olduğunda çözeltideki magnezyumun dönüşmesini engellemektedir.

3.5. Döküm Hataları

Otomotiv parçalarının düşük basınçlı alüminyum dökümünde katılaşmadan veya kalıp-sıvı metal etkileşimlerinden kaynaklı olarak metalürjik döküm hataları oluşmaktadır. Bu durum üretim maliyetleri ve ürün kalitesi açısından üretim mühendislerinin üzerinde durduğu en önemli konudur. Jant dökümünde karşılaşılan döküm hataları: makro ve mikro porozite, oksit filmler, inklüzyonlardır. Otomobil jantları için kalite standartlarınca tanımlanan döküm hataları parçanın mekanik (darbe ve yorulma dayanımı gibi) özelliklerini, sızdırmazlık özelliklerini ve yüzey özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Sektörün hızla gelişmesi ve artan rekabet sonucunda sayısız form ve buna bağlı olarak kalıp tasarım sayısının artışına neden olmaktadır. Yeni tasarımlarda özellikle estetik açıdan yüzeyi işlenmiş, yüksek parlaklıkta boyanmış, küçük jant kolu (spoke)’na sahip büyük çaplı jantlara ilgi yoğunlaşmıştır.

Seri üretim yapan sektör için oldukça yüksek kalıp maliyetleri gerektirmesi yanında kalıbın döküme alınması ve prosesin kesintisiz sürdürülebilmesi için döküm parametreleri, proses şartları ve kalıp performansının optimize edilmesi bir zorunluluktur. Jant döküm kalitesini etkileyen en önemli faktör katılaşma esnasında soğuma hızıdır. Alt kalıp parçasında soğuma yüksek basınçlı hava ile kalıp içi kanalcıklardan uygulanmaktadır. Üst kalıp da ise dış yüzeyden hava jetleri ile yapılmaktadır. Kenar kalıplarında ise soğuma hızının azaltılması (katılaşmanın geciktirilmesi) için soğuk yüzeylere refrakter esaslı kaplamalar ile yapılmaktadır. Sıvı metalin kalıba girişi ve kalıbı doldurması sürecinde sıvı metal akışkanlık özellikleri ile kalıp içerisinde katılaşma davranışı döküm hatalarını kontrol etmektedir. Döküm koşullarına ve kalıp- sıvı metal kalıp termo-fiziksel özelliklerine bağlı olarak döküm hatalarının türü, boyutu ve oluşma sıklığı değişmektedir.

Makro Porozite: Makro porozite (gözenek) veya büzülme boşluğu genel olarak kalıba yetersiz sıvı metal beslenmesi durumunda katı- sıvı dönüşümü ile hacimsel büzülme sonucunda oluşmaktadır. Jantlarda en yaygın kullanılan A356 alaşımı için büzülme yaklaşık olarak %4 oranındadır. Bu tür hataların en sık karşılaşıldığı bölge jant çemberi (rim) ile jant kollarının (spoke) kesiştiği yerlerdir. Şekil 3.11’de jant kesitinin röntgen filminde merkez ve kol bölgelerinde makro porozite kümelenmeleri (0,5-5mm boyut aralığında) açıkça görülmektedir. Bu tür hatalar jantın darbe, yorulma ve yükleme koşullarına karşı dayanımını önemli ölçüde düşürmektedir. Her jant modeli ve üretim prosesi için farklı standartlar oluşturulmakta ve tolerans sınırları belirlenmek zorundadır.

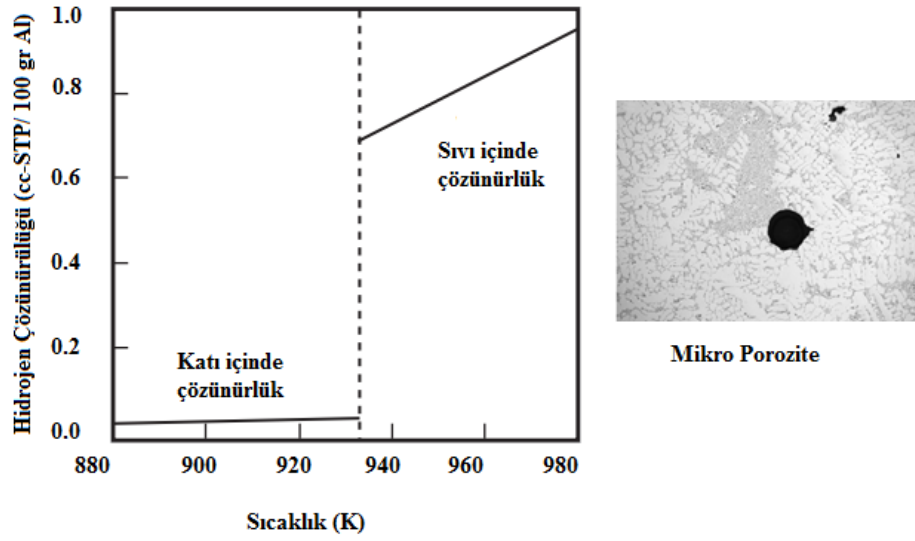


Şekil 3.11. a) Jantın topuk bölgesinde makro porozite görüntüsü b), Röntgen filmi, c) Jant kesitinde makro yüzey.

Birbirinden farklı parçalardan oluşan kalıp bileşenlerinin birbirleri arasında kalıp-kalıp, sıvı metal-kalıp, kalıp-dış ortam etkileşiminde termal davranışlar katılaşmayı kontrol ederek döküm prosesinin başarısını belirlemektedir. Makro porozitenin tespit edilmesi, belirlenen standart boyut, biçim ve dağılımı sağlamaması durumunda üretimde hurda oranı artmaktadır ki bu durum da üretim verimliliği azalmakta ve geri dönüşüm nedenli maliyetler artmaktadır. Bunu önceden engellemek amacıyla döküm simülasyon programları, sıvı metal akış kontrol programları, termal kamera ve termo kupollar ile ısınma ve soğuma eğrileri izlenerek katılaşma davranışı esnasında olası makro porozitenin engellenmesi için önlem alınmaya çalışılmaktadır.

Mikro porozite: Genel olarak $<300\mu\text{m}$ altında boyutlarda poroziteye mikro porozite adı verilmektedir. Alüminyum döküm alaşımlarında mikro porozite oluşumu oldukça karmaşık bir mekanizma olup döküm esnasında sıvı metalin dış ortam ile reaksiyona girerek hidrojen absorpsiyonu döküm kalitesini olumsuz etkilemektedir. Sıvı alüminyuma göre katı alüminyum içerisinde H_2 çözünürlüğü daha azdır (Şekil 3.12.). Bu çözünürlük alaşım kompozisyonuna bağlı olarak da değişmektedir. Alaşımda Si, Cu veya Fe gibi elementler hidrojen çözünürlüğünü düşürürken Mg'nun önemli derecede artırma etkisi vardır. Hidrojen çözünürlüğünün dengesi ergimiş metal sıcaklığı ve atmosferik su buharı basıncına bağlı olarak değişmektedir.

Çözünmüş hidrojenin başlıca kaynağı sıvı alüminyumla hemen reaksiyona giren oksit ve hidrojen oluşumuna $(2\text{Al}_{(\text{sıvı})} + 3\text{H}_2\text{O}_{(\text{gaz})} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3_{(\text{katı})} + 3\text{H}_2_{(\text{gaz})})$ yol açan nemdir. Katılaşma esnasında çözünmüş hidrojen dışarı çıkmaya çalışırken denritit kolları arasında veya yüzeyde mikro porozite oluşumuna neden olmaktadır. Mikro porozite döküm yüzeyini bozarken mekanik dayanımı azaltmaktadır. Bunu önlemek için sıvı alüminyum döküm öncesinde mutlak gaz giderme, metal temizleme işlemine, alaşım modifiye edici tane inceltici element takviyelerine gereksinim duymaktadır.



Şekil 3.12. Hidrojen çözünürlüğü nedenli mikro hatalar.

Yaz aylarında yüksek nem yüksek sıcaklıkla birleştiğinde sıklıkla dökümhanelerde düşük nem oranlarındaki kış aylarına göre çok daha fazla gaz porozitesi problemleri ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, çok iyi dağılmış hidrojen porozitesi her zaman istenmeyen bir şey olmayabilir. Hidrojen çökmesi döküm parçanın zayıf beslenmiş kesitlerinde makro porozite oluşumu ve dağılımını azaltabilir.

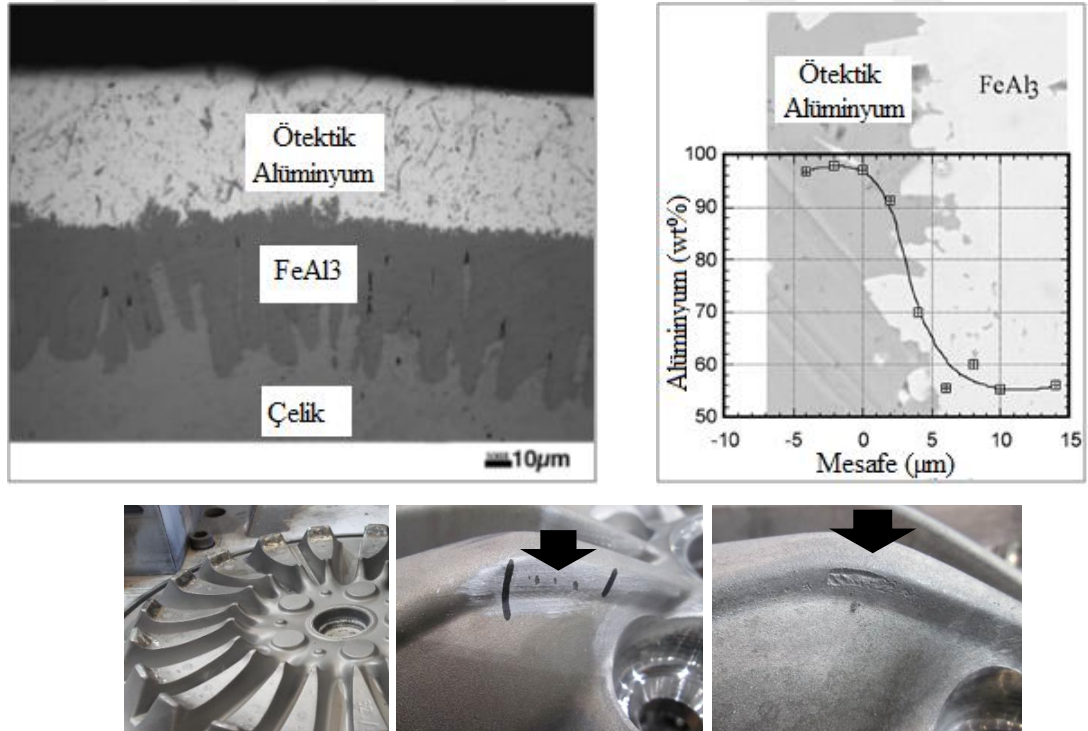
Oksit filmler: Sıvı metalin akış hızının kontrol altına alınamaması sonucunda kalıp içerisinde türbülansa neden olabilmektedir. Bu esnada sıvı metal hava ile etkileşime girerek oksit filmler oluşmaktadır. Bu tip kusurlar yorulma çatlağı oluşum için riskli bölgelere neden olmaktadır.

İnklüzyonlar: Genellikle ocaktan veya kalıptan sıvı metal ile reaksiyona giren elementler alaşımın mekanik yapısını olumsuz etkileyen alüminyum karbür (Al_4C_3), borid ve oksit şeklinde inklüzyonların oluşmasına neden olmaktadır.

3.5.1. Sıvı metal kalıp yapışma mekanizması

Alüminyum alaşımlarının basınçlı dökümü esnasında sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiş kalıp yüzeyine sıvı alüminyumun yapışması gerek kalıp ömrü, gerek döküm yüzey kalitesi açısından gerekse üretim verimliliği bakımından önemli bir unsurdur.

Üretime başlanmasından itibaren birkaç çevrim sonrasında sıvı metalin kalıba yapışması üretim duruş ve firelerini önemli oranda artırmaktadır. Kalıp maliyetlerinin oldukça yüksek olması bu durumun önemini ortaya koymaktadır. Literatür araştırmalarında iki tür yapışma veya bir diğer deyiş ile lehimleme kavramından söz edilmektedir. Bunlar yüksek sıcaklıklarda ergiyik alüminyum ile çelik arasında kimyasal/ metalürjik bağ oluşumları etkisiyle, diğeri ise düşük sıcaklıklarda mekanik etkileşim sonucunda yapışma problemleri ile karşılaşmaktadır. Kalıp yüzey özellikleri, kalıp sıcaklıkları ve sıvı metal kompozisyonu kalıp yapışmalarında etkin rol oynayan faktörlerdir. Kalıp yüzeylerinde termal dengeyi sağlamak, lubrikasyon ve termal yalıtım amaçlı kaplamalar (poteyaj) kullanılmaktadır. Sıvı metalin yüzey ile teması sonucunda poteyaj kaplamalar erozif/ adhezif bir aşınmaya maruz kalmaktadır. Poteyaj kaplamaların düşük mekanik özellikleri nedeniyle de dökülen veya yüzeyden ayrılan bölgelere sıvı metal yapışma riski artmaktadır. Kalıp çeliği ile sıvı metalin teması sonucunda karşılıklı difüzyon etkisiyle ara yüzeylerde intermetalik (FeAl_3) fazlar oluşmaktadır (Şekil 3.13.'de). Bu fazların oluşumu ve türü lehimleme mekanizmalarında etkin rol almaktadır.



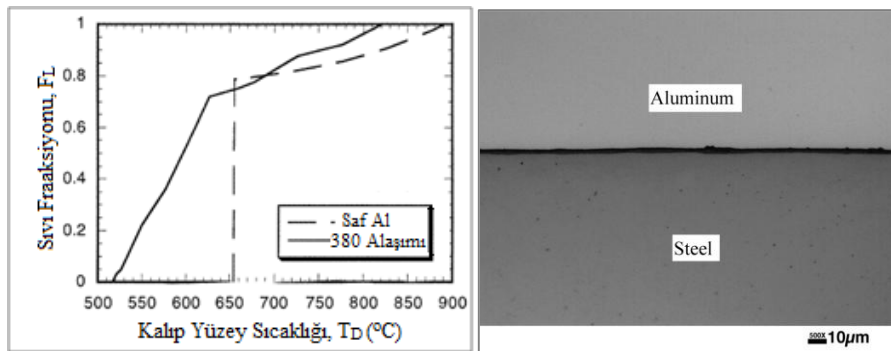
Şekil 3.13. Sıvı alüminyum ve kalıp çeliği arasındaki difüzyon etkisiyle intermetalik [29], lehimleme problemleri.

3.5.2. Yüzey pürüzlülüğü etkisi

Genel olarak literatürde bilinen kaba yüzeylerde yapışma daha kolay gerçekleşmektedir. Yüzey pürüzlülüğünün artması sıvı metal temasını ve çukur bölgelere daha hızlı tutunmasına etki etmektedir. Yüzey pürüzlü çıplak kalıp yüzeylerinde altlık sıcaklığı daha hızlı artış göstermektedir. Bu durum sıvı metal ile kalıp arasında difüzyonuda hızlandırmaktadır. Bu nedenle potetaj kaplamaların kullanılması önemli ölçüde yapışma problemlerinin önüne geçilmesinde etkin rol almaktadır. Uygulamalarda potetaj kaplamanın yüzey pürüzlülüğünün yüksek olması yanında düşük termal iletim özellikleri nedeniyle sıvı metal yapışması engellenebilmektedir. Ne zamanki potetaj kaplama kohezyon direncinin ortadan kaybolması ve kaplamanın dökülmesi ile karşılaşılır ise o zaman kalıp yüzeylerinde ciddi oranda yapışma problemleri artmaktadır.

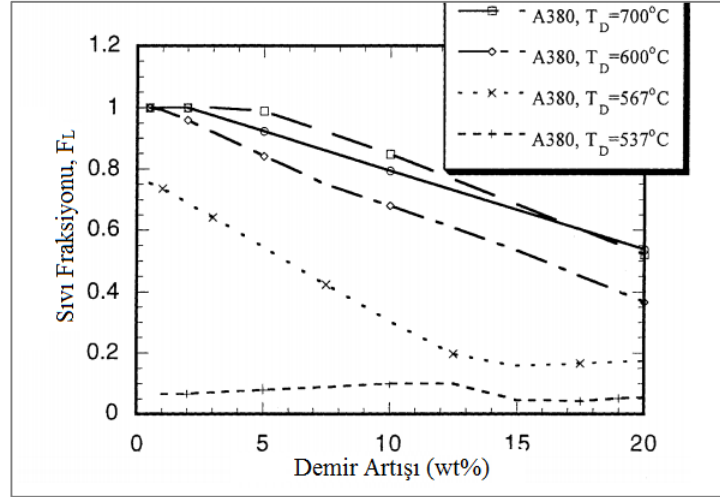
3.5.3. Kalıp sıcaklığı etkisi

Kakıp yüzey sıcaklığının artışı saf alüminyum ve alaşım alüminyum için sıvı faz oranını etkilemektedir. Bu durum kalıp yapışma eğilimini de değiştirmektedir. Aşağıda kesit mikroyapısında saf alüminyum ile çelik ara yüzeyinde intermetalik faz oluşumu gözlenmemektedir. Bu durum lehimleme riskini azaltmaktadır. Buna karşın alaşım alüminyum (A380 gibi) kullanılması durumunda kalıp sıcaklığı artışı ile lehimleme oluşma potansiyeli intermetalik fazların artışı ile artmaktadır. Burada alaşım elementlerini rolü oldukça fazladır (Şekil 3.14.).



a) Saflığa bağlı sıvı fraksiyonu. b) Saf Al/çelik ara yüzey mikro görüntüsü.

Şekil 3.14. Saflığa bağlı sıvı fraksiyonu, b) Saf Al/çelik ara yüzey mikro görüntüsü, c) Demir artışı ile sıvı fraksiyonun bağıntısı[29].

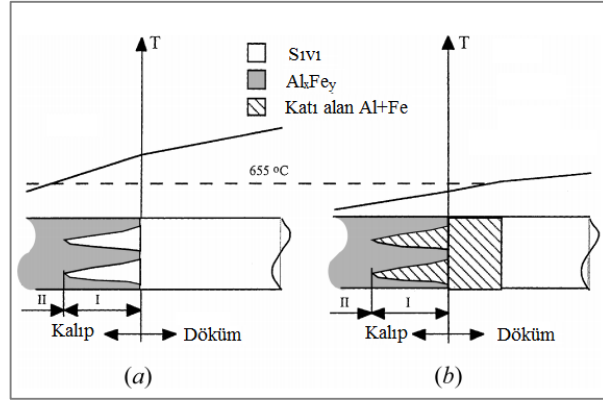


c) Demir artışı ile sıvı fraksiyonun bağıntısı.

Şekil 3.14. Saflığa bağlı sıvı fraksiyonu, b) Saf Al/çelik ara yüzey mikro görüntüsü, c) Demir artışı ile sıvı fraksiyonun bağıntısı[29](Devamı).

3.5.4. Alaşımın kimyasal kompozisyonun etkisi

Kalıp yüzeyinde lehimleme düşündüğümüzde, çelik kalıba alüminyumun dökümünde, ergimiş alüminyum kalıp yüzeyine temasını sonucu ergiyik tarafından kalıp konveksiyon ile ısınmaktadır. Yani sıvı metalden kalıp metaline ısı transferi gerçekleşmektedir. Bunun sonucunda olarak sıvı alüminyumdan kalıp çeliğine difüzyon başlamaktadır. Yüzeye nüfus eden ergimiş alüminyum yüzeydeki demiri çözerek intermetalik fazlar oluşturmaya başlamaktadır (Şekil 3.15.). Bu durum göstermektedir ki, kalıp malzemesinin içine alüminyum taşınması durumu kalıp yapışmasında oldukça önem taşımaktadır. Alaşım kompozisyonunun etkisi burada göze çarpmaktadır. Saf alüminyumun kalıba yapışma koşulları ile alaşım alüminyumun yapışma şartlarında farklılıklar söz konusudur. Bu farklılık kalıp sıcaklığına ve alaşımın kritik lehimleme sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Kalıbın yüzey sıcaklığı 655°C den yukarda olması durumunda alüminyumca zengin sıvı faz FeAl_3 fazını oluşturmaktadır. Soğuma esnasında bu faz ilk olarak katılaşmaktadır. Bu sayede kalıp sıvı metal yapışması gerçekleşmektedir.



Şekil 3.15. Yüze nüfus eden ergiyik alüminyum arayüzeyde intermetalik fazlar oluşumu [29].

3.6. A356 Alüminyum Alaşımı Jant Üretiminde Döküm-Sıcaklık, Basınç Verilerinin Analizi

Düşük basınçlı döküm prosesi (LPDC) nihai ürün şekline en yakın dökümün elde edilebildiği döküm yöntemlerinden bir tanesidir. Alüminyum alaşımı (A356; Al-7%Si-0.3%Mg) jantların üretiminde, yüksek döküm kalitesi ve düşük üretim maliyetlerinin yanı sıra seri üretime elverişli, hassas toleranslarda tekrarlanabilir kaliteye sahip olması nedeniyle tercih edilen verimli bir üretim yöntemidir. LPDC prosesi çevrimsel bir proses olup, ergitme fırının basınçlandırılması ile süreç başlamaktadır. Fırın içerisinde oluşturulan basınç alüminyum eriyiği (sıvı metal) yolluk vasıtasıyla yukarı doğru iterek kalıp boşluğuna doldurulmasını sağlamaktadır. Bu proses Pascal Teorisine bağlı olarak çalışmakta olup süre, sıcaklık, basınç ve akış hızından etkilenmektedir. Sıvı metalin kalıba girmesi ile birlikte kalıp-sıvı metal arasında karşılıklı ısı transferi başlamaktadır. Kalıpta ısınma başlarken, sıvı metal soğumaktadır. Kalıbın tamamen dolmasını takiben daha düşük sıcaklıktaki kalıp yüzeyinin etkisiyle sıvı metal belirli bir hızda soğumaya başlamakta ve kalıp içerisinde katılaşmaktadır. Kalıbın sıvı metal ile dolumu alt kalıp boşluğundan üst kalıp boşluğuna doğru yerçekimine ters yönde oldukça yavaş ve kontrollü bir şekilde gerçekleşmektedir. Kalıbın tamamen dolmasıyla birlikte basıncı artmaktadır. Kalıbın içinde düşük basınç altında döküm parçasının gözeneksiz, gaz boşluksuz ve büzülme göstermeksizin katılaşması gerekmektedir. Katılaşma sonrası ise kalıp yüzeylerinden kolay ayrılmalı ve yapışmaması önem arz etmektedir.

Döküm verimliliği ve proses performansı doğrudan hata içermeyen döküm yapısının yanı sıra, kalıbın basma sayısı (ömrü) ve çevrimi tekrarlama kabiliyeti ile ilişkilidir. Kalıp ömrünü belirlemek ve üretim maliyetlerini düşürmek oldukça zor bir iştir. Kalıp tasarımcıları bu nedenle üretim öncesinde prototip kalıp tasarımları yapar ve döküm öncesinde olası riskli bölgeleri belirleyerek kalıp performansını artırıcı önlemler almaya çalışırlar. Kalıp döküm makinesine bağlandıktan sonra binlerce baskı yapacağından kalıbın aksaması veya ürün kalitesinin yeterli seviyelere ulaşmaması kalıp tamir ve bakım maliyetlerini artırırken, kaybedilen süre zarfında üretim kayıpları ve üretim fireleri nedeniyle üretici için yüksek maliyetler ortaya koymaktadır.

Bu doğrultuda kalıp tasarımcıları için döküm prosesini simüle eden yazılımlar geliştirilmiştir (1960’larda kullanılmaya başlanmıştır). Bu simülasyon yazılımları geleneksel deneme yanılma yaklaşımının meydana getirdiği problemlerin önüne geçmektedir. Bu sayede önceden önlem alınarak üretim kalitesi artırılabilir. Olası döküm hatalarının engellenmesi ile döküm kalitesi yükseltilmektedir [32].

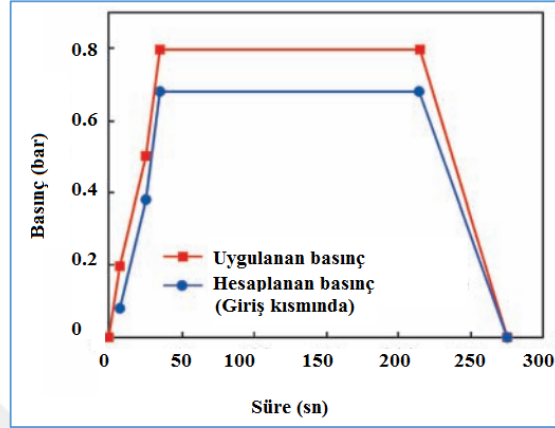
3.6.1. Kalıp-sıvı metal arası etkileşimler

Basınç sınır koşullarının belirlenmesi sıvı metalin akış hızını ve kalıbı uygun şekilde doldurmasını etkilemektedir. Ergiyik dolu fırın potasına uygulanan basınç etkisiyle sıvı metal yolluk borusunda yukarı doğru yükselerek kalıp girişine doğru hareketlenmektedir. Bernoulli Denklemi aracılığıyla sıvı metalin döküm girişindeki basınç seviyesi hesaplanabilmektedir.

Sıvı metal akış hızını çok düşük olarak kabul edersek, sıvı metal hacmi döküm hacminden daha yüksek olacaktır ($V_{\text{sıvı metal}} > V_{\text{döküm}}$). Giriş basıncı doğrudan uygulanan hava basıncından sıvı metalin hidrostatik basıncının çıkarılmasına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Yolluk içinde sıvı metal seviyesi eriyik metal potasında seviyenin azalmasıyla birlikte artmaktadır.

Teoride kalıbın dolması esnasında uygulanan basıncın artış hızı ile yolluk içerisindeki sıvı metal basıncının artış hızı sabit olarak hesaplanmaktadır. Ama gerçekte bu iki

basınç arasında belirgin bir fark söz konusudur. Literatür incelemelerinde 700 °C de döküm sıcaklığında ve 300 °C de kalıp sıcaklığında yapılan döküm simülasyon sonuçlarına baktığımızda (Şekil 3.16.) bu durum aşıkardır [33]. Döküm çevriminde (280 sn) bu fark yaklaşık 0.2 bar (20kPa) seviyesindedir.



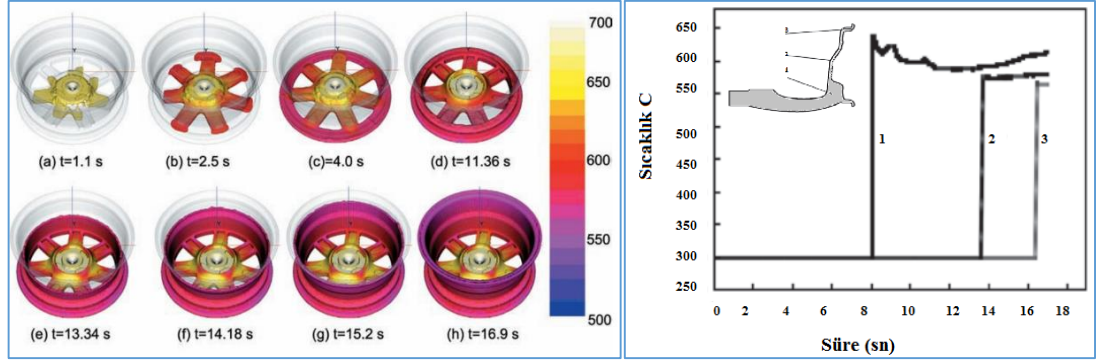
Şekil 3.16. Düşük basınçlı döküm esnasında basınç değişim eğrisi[33].

Şekil 3.17.'de LPDC prosesi ile jant üretiminde sıvı metalin kalıba dolumu esnasında ve katılaşma esnasında sıcaklık değişimleri sergilenmektedir. Kalıba dolum esnasında kalıpta en yüksek sıcaklığa sahip bölgeler göbek (hub) bölgesi 650-700 °C sonrasında ise jant kollarıdır (spoke) (600-650 °C arasındadır). Eriyik metal kalıpta hub bölgesinden beslendiği için en son katılaşan bölge de burasıdır. Jantın kenar kısmı (rim) olarak belirtilen bölgeler daha düşük sıcaklıklarda olup katılaşma esnasında da ilk katılaşan bölgeler buralarıdır [33].

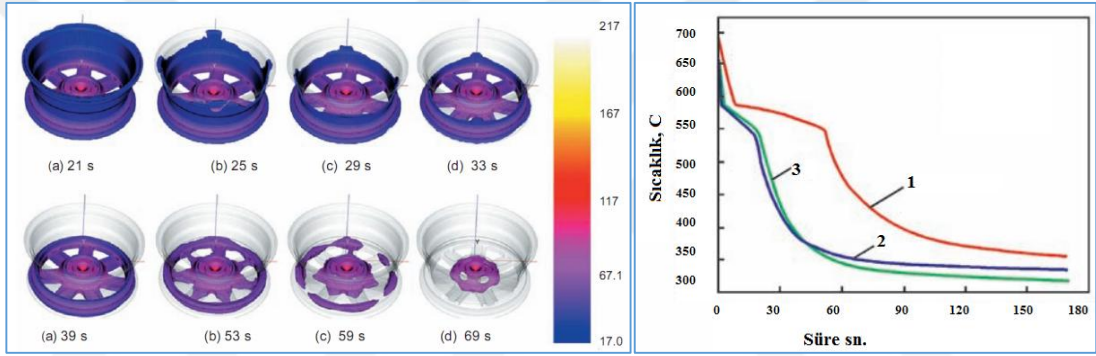
Şekil 3.17-a.'da görüleceği üzere sıvı metalin kalıba girişi 1.1 sn'de kalıbın merkezini doldurmak, sonrasında 2.5 sn'de jant kollarına ve 4.sn'de ise jant kenarından sıvı metal yukarı doğru yükselmektedir. Tam dolum süresi 16.9 sn'dir. 700 °C'de sıvı metal jant kalıp kenarlarında yaklaşık 590-600 °C'ye soğumuştur.

Şekil 3.17-b.'de ise sıvı metalin kalıp içinde katılaşma esnasında sıcaklık değişimi sergilenmektedir. Toplam katılaşma 192 sn'dir. Jant kollarında katılaşma 53'de başlayıp, 59. sn'lerde tamamlanmaktadır. Bu noktalar diğer bölgelere göre daha hızlı katılaşma sergilemiştir. Katılaşma esnasında özellikle 1 (spoke) ve 3 (rim) nolu

bölgelerin kesişimlerinde eriyik adacıklarının katılaşma esnasında sıcak kalması büzülme boşluk riskine neden olabilmektedir.



a. sıvı metalin kalıba dolumu esnasında



b. katılaşma esnasında

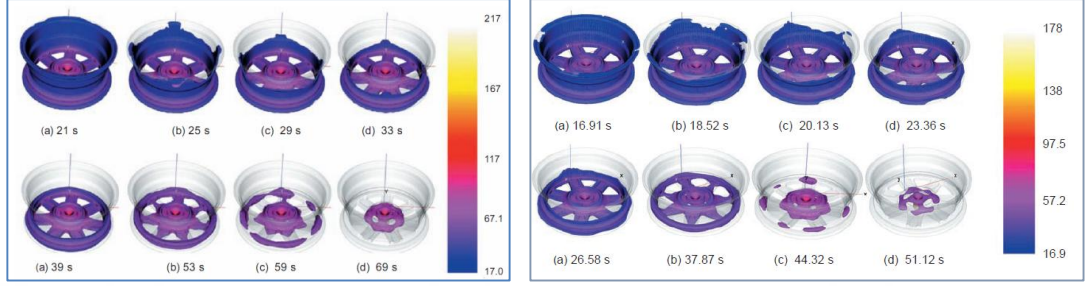
Şekil 3.17. LPDC prosesi ile jant üretiminde anlık sıcaklık değişimi görüntüleri[33].

Şekil 3.18.'den görüleceği üzere simülasyon programında jant üzerinde olası hata bölgeleri ve gerçek döküm parçası üzerinde röntgen filminde yapılan incelemeler ve mevcut hatalar önceden belirlenebilmektedir. Bu durum simülasyon programı ile yapılan analiz sonuçlarının doğruluğunu ön değerlendirme sürecinde faydalı ve başarılı bir rehberlik ettiğini göstermektedir.



Şekil 3.18. Jant üzerinde hata riski bölgeleri ve röntgen filminde gerçek hata pozisyonları [33].

Yukarıda olası hataların indirgenmesi amacıyla kalıp soğutma sisteminde revize gerekmiştir. Bu bağlamda yapılan soğutma dizaynı ile Şekil 3.19-b. de görüleceği üzere spoke bölgelerinde katılaşma daha hızlı bir şekilde 44.32 sn’de tamamlanmış ve hata gözlenmemiştir.



a. Soğutma revize edilmeden önce

b. Soğutma revize edildikten sonra

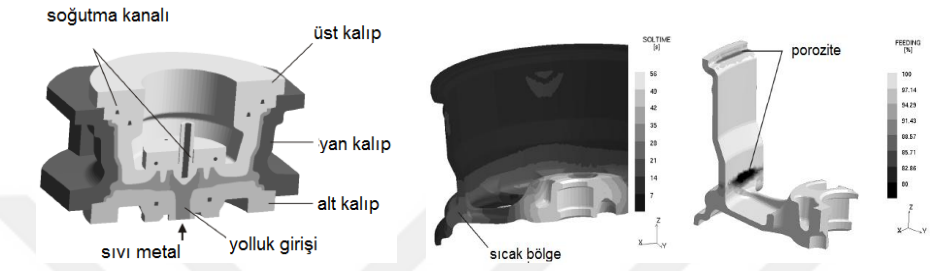
Şekil 3.19. Soğutma sisteminin jant parçasının katılaşma davranışına etkisi[33].

LPDC prosesinde kalıba dolum stabil olduğu takdirde döküm kalitesini etkileyen faktörlerin başında döküm ve kalıp sıcaklıkları gelmektedir. Katılaşma davranışı bu iki parametreden önemli ölçüde etkilenmektedir [32]. Xiang ve arkadaşlarının araştırmalarında farklı kalıp ve döküm sıcaklıkları için katılaşma süresini incelemişler ve optimum parametreleri belirlemişlerdir. Tablo 8.’de deneysel kurgu ve parametreler sergilenmektedir.

Yapılan incelemelerde proses kalitesini etkileyen (porozite oranı ile ilişkili olarak) en önemli faktörün alt kalıp ve maça sıcaklığı olduğu belirlenmiştir (Tablo 3.2.). Bu iki faktörün diğer faktörlere üstünlük sağladığı ifade edilmektedir [31]. C. Reilly (2013), yaptıkları çalışmalarda ise genel olarak döküm hatalarının nedenini ısı transferine ve akışkan hızına bağlı olarak kontrol edildiğini ifade etmektedirler.

Tablo 3.2. Spoke üzerinde farklı proses sıcaklıklarına bağlı olarak katılaşma hızı değişimi[32,34].

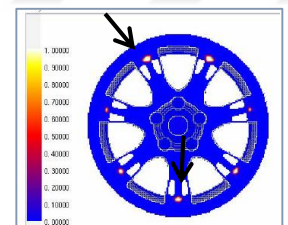
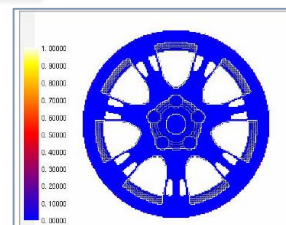
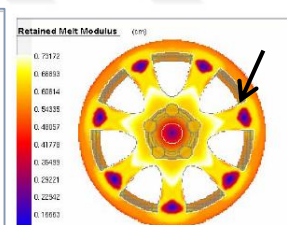
	$T_{Döküm}$	$T_{üst kalıp}$	$T_{alt kalıp}$	$T_{yan kalıp}$	$T_{(orta merkez)}$
Proses Sıcaklıkları (°C)	650	250	350	200	350
	670	300	400	250	400
	690	350	450	300	450
	710	400	500	350	500
5 parametre, 4 seviyede 16 deney ile ölçülmüştür L16(4⁵)					



Katılaşma süresi (sn)

Optimum parametreler (Taguchi)	650 C döküm sıcaklığı, 400 C üst kalıp sıcaklığı, 500C alt kalıp sıcaklığı, 200 C yan kalıp sıcaklığı, 350 maça sıcaklığı
Optimizasyon (Yapay zeka)	668 C döküm sıcaklığı, 344 C üst kalıp sıcaklığı, 468 C alt kalıp sıcaklığı, 227 C yan kalıp sıcaklığı, 478 maça sıcaklığı
Standart parametreler	690 C döküm sıcaklığı, 350 C üst kalıp sıcaklığı, 350 C alt kalıp sıcaklığı, 250 C yan kalıp sıcaklığı, 500 maça sıcaklığı

Mikro Porozite

Standart **Optimum** **Arta kalan eriyik oranı**

Zhang ve arkadaşları kalıbın içerisinde jantın sıcaklıklarının değişimini belirlemek üzere matematiksel bir model ile bilgisayar tabanlı ısı akışı üzerinde çalışmışlardır. Bu modelde hedef katılaşma esnasında sıvı metal içerisinde hapsolan hava ve gazın neden olduğu makro porozitenin ve büzülme boşluklarının azaltılmasına yönelik ön değerlendirme kabiliyetinin geliştirilmesidir.

Sıvı metal kalıp boşluğunu doldururken ve kalıp boşluğunu doldurduktan sonra sıvı metalin ısısı kalıp duvarı tarafından önce kalıba oradan da çevreye transfer olur (Şekil 3.20.). Kalıp ve döküm alaşımının yüksek ısıl iletkenliğe sahip olduğu durumda (Şekil

3.17.) döküm parça-kalıp arayüzeyin ısıl direnci ısı transferini ve soğuma hızını kontrol eder. Bu direnç genellikle ısı transfer katsayısı (λ) terimi ile ifade edilir. Isı transfer katsayısı zamana bağlı olarak değiştiği için döküm parçadan kalıba olan ısı akışında arayüzeyin gösterdiği direncin gerçekçi olarak belirlenmesi zordur. Arayüzey direnci metalik kalıp ve basınçlı dökümler başta olmak üzere birçok endüstriyel döküm yöntemlerinde özellikle önem taşımaktadır.

Metalik kalıplara (kokil kalıba döküm, alçak basınçlı döküm ve yüksek basınçlı döküm) yapılan dökümlerde kaliteli parça üretimi için kalıp sıcaklığının sabit tutulması gerekmektedir.

Bu en hassas olarak kalıp şartlandırıcısı yardımı ile yapılabilmektedir. Kalıp şartlandırıcısı ısı transfer yağını/suyunu belirlenen sıcaklıkta tutarak kalıp sıcaklığının sabitlenmesini sağlamaktadır. Arayüzey ısı transfer katsayısı ile ilgili yapılan araştırmalarda soğutma sıvısı olarak büyük çoğunlukla su kullanılmaktadır.[30,31].



Şekil 3.20. Sıvı metal kalıp boşluğunu dolumunda çevreye olan ısı transferi.

Çalışmada ısı transferi Tablo 3.3.'de gösterildiği gibi 4 adımda incelenmiştir: 1. Adım: ilk 15 sn de kalıbın dolumu esnasında janttan kalıba ısı transferi yoktur, 2. Adımda: janttan kalıba ve kalıptan ortama ısı transferi mevcuttur (245 sn süresince). 3. Adımda: yan kalıptan ve alt kalıptan ortama ısı transferi yanında janttan üst kalıba

ve ortama, üst kalıptan ortama ısı transferi (25 sn) söz konusudur. 4. Adımda ise yan kalıptan, alt kalıptan ve üst kalıptan ortama ısı transferi söz konusudur (35sn).

Tablo 3.3. LPDC prosesinde ısı transferi 4 adımda şu şekilde ele alınmaktadır[35].

Kalıp ara yüzey kesiti	Süre	Isı transfer katsayısı $W/m^2/K$
Üst Kalıp / Yan Kalıp	$0 \leq t \leq 260$ sn (Adım 1,2)	2000
Üst Kalıp / Alt Kalıp	$0 \leq t \leq 260$ sn (Adım 1,2)	500
Yan Kalıp / Alt Kalıp	$0 \leq t \leq 260$ sn (Adım 1,2)	1000
Üst Kalıp /Üst Kalıp	$0 \leq t \leq 320$ sn	500
İzolasyonu	(Adım1,2,3,4)	
Yan Kalıp /Yan Kalıp	$0 \leq t \leq 320$ sn (Adım	500
İzolasyonu	1,2,3,4)	
Not: Adım 1 Kalıbın dolumu, Adım 2 Jantın kalıpta katılaşması, Adım 3 yan ve alt kalıbın açılması,(üst kalıbın jant ile temasta) ve Adım 4 alt ve üst kalıbın açılması.		

Tablo 3.4. Jant kalıbı üzerinde ara yüzeylerde ısı transfer katsayısının değişimi[35].

Yüzey	Bölüm(yüzey)	Zaman (Adım)	Isı transfer katsayısı	Ortam sıcaklığı	Yüzey Emisivite
Üst kalıp (Dış yüzeyler)	Üst		20	225	0.7
	Yan	$0 \leq t \leq 320$ s	175	225	0
	İç	(Adım 1,2, 3, 4)	45	300	0
	izolasyon		20.0	300	
Üst kalıp (Alt ve Yan kalıplar ile olan yüzeyler)		$260 \leq t \leq 320$ s (Adım 3, 4)	10	200	0.7
Üst kalıp jant ile temas yüzeyi)		$285 \leq t \leq 320$ s (Adım 4)	10	200	0.7
Alt kalıp(Dış yüzeyler)	Alt	$0 \leq t \leq 320$ s	20.0	300	0.7
	Üst	(Adım 1,2, 3, 4)	150	250	0

Tablo 3.4. Jant kalıbı üzerinde ara yüzeylerde ısı transfer katsayısının değişimi[35](Devamı).

Yüzey	Bölüm(yüzey)	Zaman (Adım)	Isı transfer katsayısı	Ortam sıcaklığı	Yüzey Emisivite
Yan kalıp (Dış yüzeyler)	Alt	0≤t≤320 s (Adım 1,2, 3, 4)	100.0	225	0
	Yan		20.0	225	0.7
	İzolasyon		20.0	225	0
Yan kalıp (Yan kalıbın jant ile temas eden)		260≤t≤320 s (Adım 3, 4)	10	200	0.7
Alt kalıp (üst, alt kalıbın ve jant yüzeyleri)		260≤t≤320 s (Adım 3, 4)	10	200	0.7
Alt kalıp soğuması	Kanal #1 ve #2	60≤t≤280 s	175	88.82–0.71α	0
	Kanal #3	20≤t≤310 s	135	305.00–4.3α	0
	Kanal #4	20≤t≤130 s	75	153.53–1.88α	0
	Kanal #2				
Üst kalıp soğuması	(Belirli bir alan için)	80≤t≤275 s	60	50	0
	Kanal #4				
	(Belirli bir alan için)	0≤t≤120 s	100	50	0

Bu bağlamda deneysel çalışmalarında kalıba 0.5 mm çapında K tipi termokupullar bağlanarak sıvı metal ile kalıp arasında ısı transferine bağlı ısıl değişimleri gözlemlemiştir. Bu modelde özellikle jantın farklı bölgelerinde ara yüzeylerde ısı transferi değerlendirilmiştir [34]. Tablo 3.4.'de ısı transfer katsayısının döküm çevriminde zamana bağlı olarak ara yüzeylerde değişimi sergilenmektedir.

A356 alaşımının ısı transferi katsayısı (163–134 W/m/K), H13 kalıp çeliğinin ısı transferi katsayısı 24–28 W/m/K), Dökme demir kalıp çeliğinin ısı transferi katsayısı (28–60 W/m/K). A356 döküm alaşımı yaklaşık 613 °C de primer α- alüminyum formunda olup 567 °C'ye kadar bu yapıyı korumaktadır. Bu sıcaklıktan sonra α- alüminyum oluşumu tamamlanır ve farklı ötektik bileşikler meydana gelmektedir.

Bunun sonucunda mikroyapı hacimce %50 α - alüminyum ve geriye kalan %50 ise ötektik bileşenlerden oluşmaktadır. Alaşımda mevcut ısının % 50'si 613 °C'den 567 °C'ye soğuma esnasında transfer edilmektedir. Diğer %50'lik kısım ise 567 °C'den 533 °C'ye sıcaklık azalması esnasında transfer olmaktadır. Toplam kalori kaybı 397.5 kJ/kg'dur [35]. Tablo 3.5.'de jant kalıbı üzerinde kullanılan malzemelerin ısı transfer katsayısının değişimi sergilenmektedir.

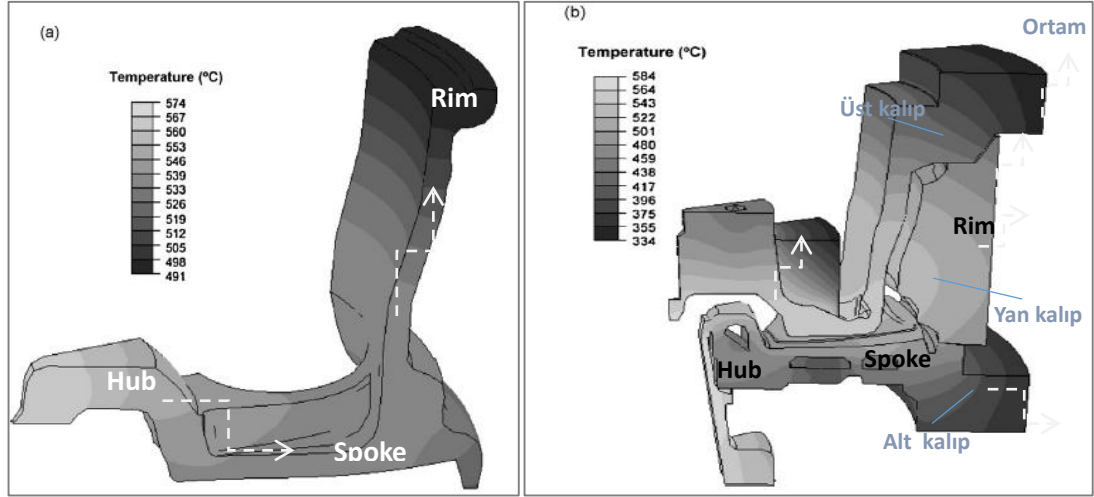
Tablo 3.5. Jant kalıbı üzerinde kullanılan malzemelerin ısı transfer katsayısının değişimi.

Malzeme	Termal İletkenlik		Isı kapasitesi		Latent Isısı		Yoğunluk ρ (kg/m³)
	T (°C)	k(W/m/K)	T(°C)	C _p (J/kg/K)	Sıcaklık aralığı (°C)	L (kJ/kg)	
A356	25	165	25	880	613.2>T≥610.7	51.02	2369
	100	165	100	921	610.7>T≥588.2	91.20	
	200	162	200	967	588.2>T≥567.2	48.74	
	300	155	300	1011	567.2>T≥563.6	170.36	
	380	153	400	1055	-		
	500	145	500	1098			
	567	134	567	1127			
	614	400*(65.8)	614	1190			
	700	400*(67.9)	>700	1190			
	800	400*(70.0)					

Tablo 3.5. Jant kalıbı üzerinde kullanılan malzemelerin ısı transfer katsayısının değişimi(Devamı).

Malzeme	Termal İletkenlik		Isı kapasitesi		Latent Isısı		Yoğunluk ρ (kg/m ³)
	T (°C)	k(W/m/K)	T(°C)	C _p (J/kg/K)	Sıcaklık aralığı (°C)	L (kJ/kg)	
Dökme Demir	20	60.0	20	548			
	140	60.0	100	548			
	280	44.1	662	622			
	420	40.9	803	705	-	N/A	7300
	560	37.1	1100	746			
	700	33.6	1200	>916			
	840	28.1					
H13	20	24.60	23	458.8			
	200	26.25	200	518.5			
	500	27.30	400	587.8			
	600	27.76	600	726.2	-	N/A	7367
	800	28.07	700	905.4			
	850	28.39	760	1151.1			
İzolasyon	25	1.34	0	821			
	260	1.34	100	900			
	538	1.45	200	969			
	816	1.54	300	1027	-	N/A	2291
			400	1075			
			500	1111			
			600	1137			

Şekil 3.21-a.'dan görüleceği üzere jant üzerinde ısı transferi sıcak hub bölgesinden spoke ve rim bölgesine doğrudur. Bu sıcaklık dağılımlarına baktığımızda: Hub (550 - 575 °C), Spoke (540-560 °C), Rim (500-540 °C) arasında değişmektedir. Kalıp içerisinde sıcaklık dağılımına baktığımızda ise (Şekil 3.21-b.) de janttan kalıba, kalıptan ortama ısı transferi akış yönü görülmektedir. Isıl kontürlere baktığımızda özellikle üst kalıp/ yan kalıp ve alt kalıp/ yan kalıp ara yüzeylerinde ısı transferi diğer ara yüzeylere göre daha fazladır.



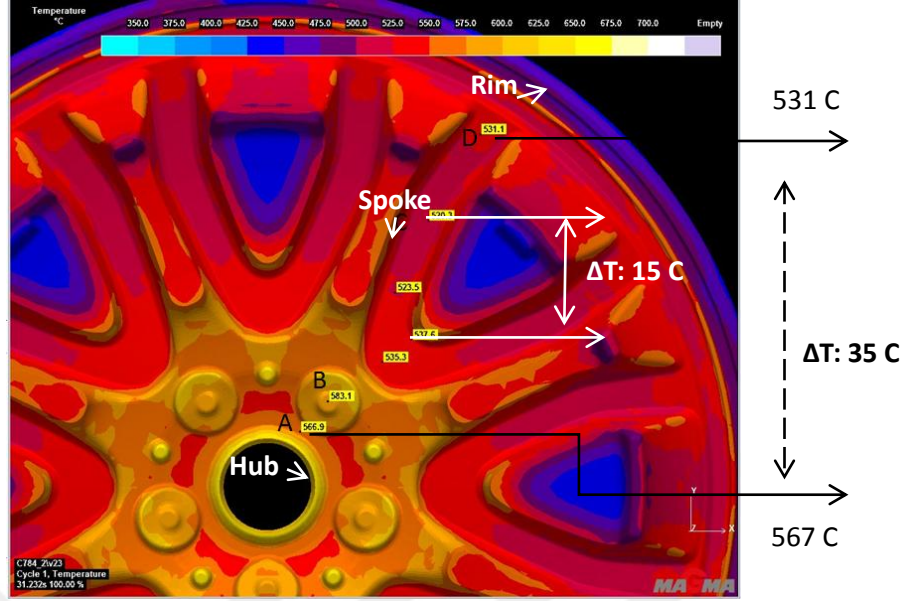
Şekil 3.21. Henüz dökülen jantın sıcaklık değişimi ve ısı transferi yönü a) Döküm parçası, b) Kalıp parçaları.

3.7. CMS Jant Kalıbında İncelemeler

3.7.1. Sıvı metalin kalıba dolumu esnasında sıcaklık değişimi

15” boyutlarında A356 alüminyum alaşımı standart jant üretimi için 1. çevrimde alt maça kalıp yüzeylerinde Şekil 3.22.’de görüleceği üzere farklı noktalardan (A:Hub, B:Civata bölgesi C:Spoke, D: Rim) sıcaklık ölçüm sonuçları kaydedilmiştir. MAGMASoft simülasyon yazılımı aracılığıyla döküm prosesinde dolum esnasında eriyik sıvı metal (720 °C) ile kalıp arasında ısı transferi etkisi ile sıcaklık değişimleri gözlemlenmiştir.

Alt maçada A ve B noktası ile tanımlanan Hub bölgesi diğer C ve D noktalarına göre daha yüksek sıcaklık (583°C $T_B > 567^{\circ}\text{C}$ $T_A > 531^{\circ}\text{C}$ $T_D > 520^{\circ}\text{C}$ T_C) gözlenmiştir. Sıvı metalin aşağıdan yukarı doğru enjekte edilmesi sonucunda kalıba ilk giriş yeri olan merkez hub bölgesine ergimiş haldeki alüminyum metali ile ön ısıtma uygulanmış ve daha düşük sıcaklıktaki kalıp yüzeyi arasında temas anından itibaren karşılıklı olarak ısı transferi gerçekleşmektedir. Bu nedenle merkez bölgesinin sıcaklığı daha yüksek olup jant kollarına (spoke) ve jant kenarına (rim) doğru sıcaklık düşmektedir. En iç kısım (A) ile en dış kısım (D) noktaları arasında 35°C lik bir sıcaklık farkı gözlenmektedir.



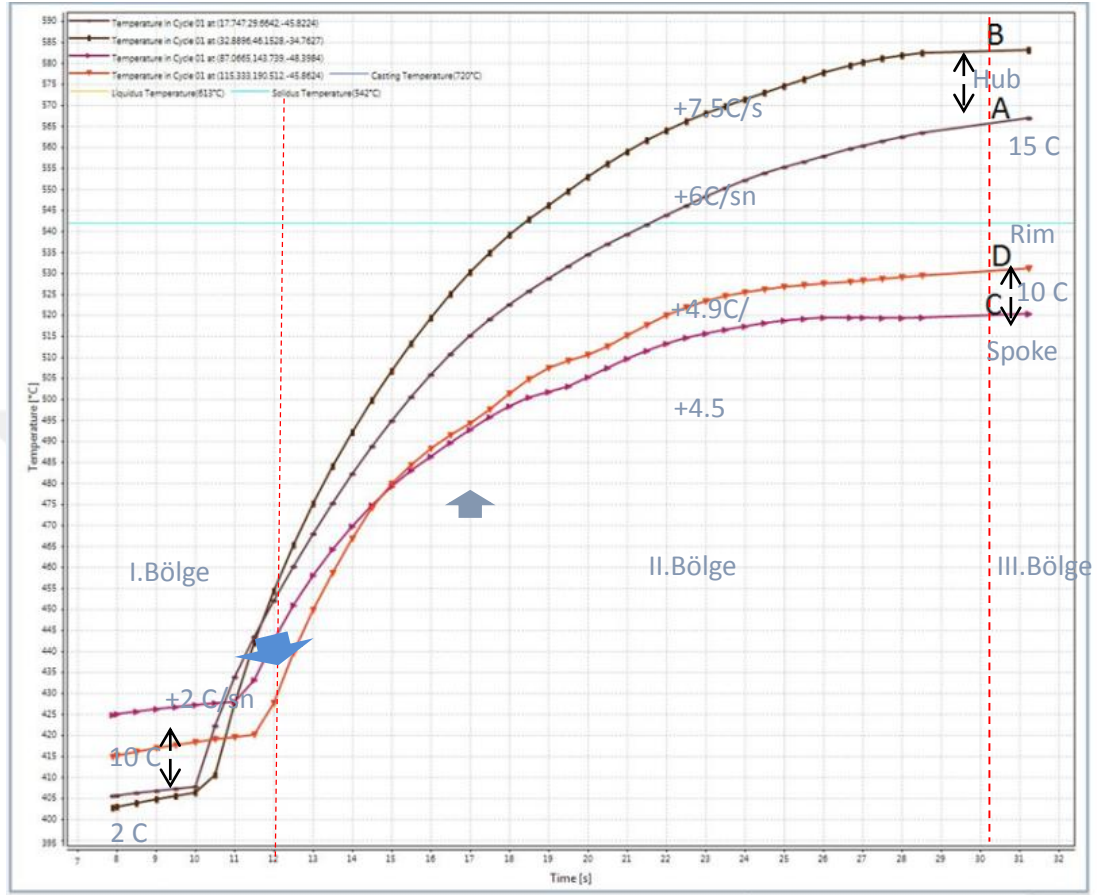
Şekil 3.22. Sıvı metalin kalıp boşluğunu doldurması esnasında kalıp üzerinde sıcaklık ölçümü yapılan noktalar (30 sn sonrasında).

Hub bölgesinde T_A ve T_B noktalarının farklı sıcaklık değerleri gözlenmektedir. Bu sıcaklık farkının nedeni A ve B noktalarının farklı geometrik, kalınlık yapısından kaynaklı olarak B noktasına sıvı metal temasının daha fazla olması sonucunda noktasal ısınması şeklinde yorumlanabilmektedir. Buna karşın orta delik bölgesinde hızlı soğuma etkisinden kaynaklı olarak A noktasının sıcaklığının azaldığı düşünülmektedir.

Spoke bölgesinde de T_C ve T_D noktalarının farklı sıcaklık değerleri ile karşılaşılmıştır. C noktası jant kolu (spoke) üzerinde yer almaktadır. D noktası ise spoke ile rim ara kesişim noktası olup C noktası ile arasında 10-15 °C sıcaklık farkı söz konusudur. Spoke üzerinde et kalınlığına ve geometrisine bağlı olarak soğuma hızının farklılaşmasının bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Jant spoke kolları arasındaki boşluklar spoke yüzeyinde soğuma hızına etki etmektedir. Isı transferinde etkin rol oynamaktadır.

MAGMASoft simülasyon programı ile oluşturulan alt maça arayüzeyinden alınan data noktalarının kalıp dolumu esnasındaki sıcaklık (°C) – zaman (s) grafiği Şekil 3.23’de sergilenmektedir. T-t grafiğini incelediğimizde başlangıçta birbirine yakın sıcaklıklarda (400-425 °C) olan noktaların (I. Bölge), 10.-12. saniye sonrasında hızlı

bir artış ivmesi göstermektedir (II. Bölge), 30. saniye sonrasında ise noktasal konumuna göre stabil bir sıcaklık değerine ulaşmaktadır (III. Bölge).



Şekil 3.23. Dolum esnasında belirlenen noktaların sıcaklık değişimleri.

I.Bölge: Spoke yüzeyinde (C noktası) başlangıç sıcaklığı 425 °C seviyesindedir. D noktasının sıcaklığı ise 415 °C'dir. Başlangıç konumunda C-D noktaları arasında sıcaklık farkı 10 °C 'dir. A ve B noktalarının sıcaklıkları ise sırasıyla 405 °C ve 403 °C olup sıcaklık farkı ihmal edilebilir bir seviyede olup 1-2 °C'dir. 11. saniyeye kadar sıcaklık artışı 2 °C/sn hızında olup oldukça yavaştır.

II.Bölge: Tüm noktasal bölgelerde 11.saniyeden sonra hızlı bir sıcaklık artışı gözlenmektedir. Özellikle hub bölgesinin (A, B) sıcaklık artış ivmesi (6-7.5 °C/sn), spoke bölgesinde (C,D) sıcaklık ivmesine (4.5-5 °C/sn) göre daha yüksektir. 15. saniyeye kadar C noktası D noktasına göre 2-3 °C daha sıcaktır. C ve D noktalarının sıcaklık eğrilerine bakıldığında 15. saniyede (yeşil çizgili dairesel bölgede gösterilen)

D eğrisinin C eğrisinin üzerine çıktığı görülmektedir. D noktasının spoke ile rim bölgelerinin kesişim noktası olduğundan dolayı döküm boşluğu hacmi C (spoke) bölgesinden daha fazladır bununla birlikte her spoke bölgesini çevreleyen alt ve üst kalıpların ısı transferine etkisi nedeni ile bu fark ortaya çıkmaktadır. Benzer şekilde A ve B noktalarının eğrileri de 11. saniye sonrasında birbiri üzerinde yer değiştirmektedir. B eğrisinin sıcaklık artışının A eğrisine göre kısmen daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

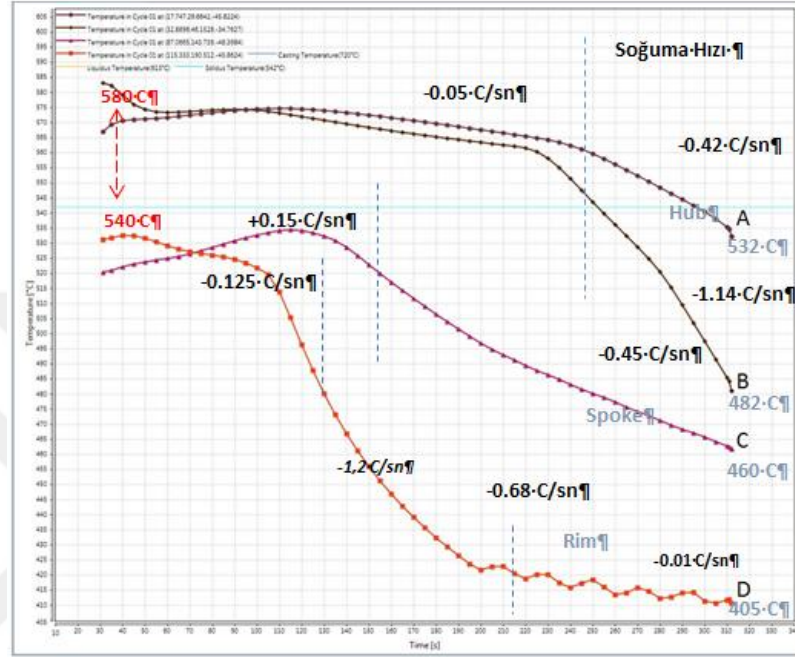
III. Bölge: Belirlenen noktaların sıcaklık eğrileri bu bölgede yeniden (25-30 sn sonrasında) stabil bir konuma geçmektedir. A ve B eğrileri arasındaki sıcaklık farkı 15 °C iken C ve D eğrileri arasında 10 °C'lik bir fark gözlenmektedir. Bu durumda B noktasının daha fazla ısındığı belirlenmiştir. C ve D noktaları yani spoke ve rim bölgeleri dolum esnasında A ve B noktalarından düşük sıcaklıklarda kalmalarının nedeni yolluk girişine uzak olmalarındandır.

3.7.2. Sıvı metalin katılaşması esnasında sıcaklık değişimi

Şekil 3.24.'de sıvı metalin kalıba dolumu sonrasında soğumaya başlaması ile katılaşma esnasında belirlenen noktaların soğuma eğrileri sergilenmektedir. 30. Sn ile 330.sn arasında (5 dak) zaman zarfında farklı soğuma hızı değişimleri gözlenmektedir. Her noktanın soğuma hızı ivmeleri farklıdır. Görüleceği üzere merkez bölgesinde yer alan A ve B noktaları 30-230 sn arasında oldukça yavaş 0.05C/ sn hızında soğumaktadır. 230. Sn sonrasında soğuma hızı artış göstermektedir. Sırasıyla A noktasının soğuma eğrisi ivmesi 0.42 °C/sn iken B noktasının 1.14 °C/ sn olduğu tespit edilmiştir. B noktasının daha hızlı soğuduğu ve katılaşmaya başladığı görülmektedir. Genel olarak soğuma eğrilerine bakıldığında A ve B noktalarının soğuma eğrilerinin daha yavaş olduğu belirgin bir şekilde gözlenmektedir. Katılaşma esnasında da en son katılaşan bölge olması nedeniyle bu durum aşikardır.

Jant kollarında (spoke), C ve D noktaları hızlı soğuma sergilemektedir. Kesit kalınlıklarının ve geometrisinin soğuma hızına etkisi bu noktalarda belirgin bir şekilde gözlenmektedir. Başlangıçta oldukça yavaş soğuma hızı, 120.-150. Sn sonrasında ivme

kazanmaktadır. 0.125 C/sn soğuma hızından 0.4-0.7 C/sn seviyesine artış sergilemektedir. C noktasında sürekli soğuma hızı ortalama 0.45 C/sn'dir. Buna karşın D noktasında soğuma hızı 200.saniyeye kadar 1.2 C/sn olup, 200.-300. Saniyeler arasında önemli ölçüde yavaşlamakta ve 0.01 C/sn hızında soğuma gerçekleşmektedir.



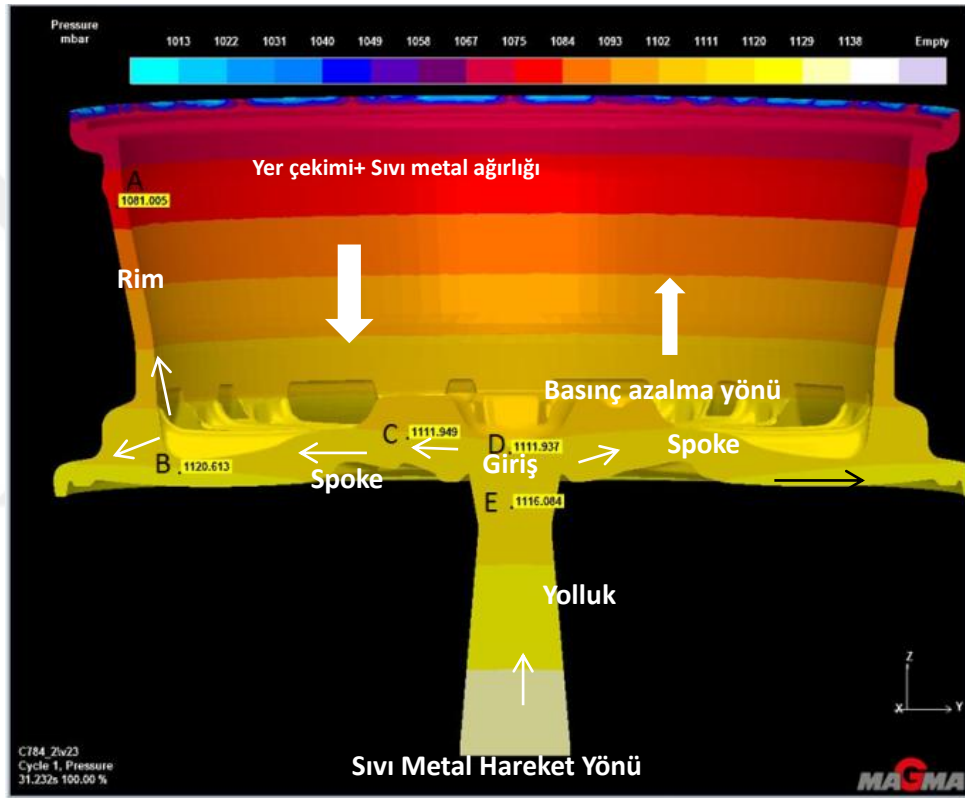
Şekil 2.24. Katılaşma esnasında belirlenen noktaların soğuma eğrileri.

Katılaşma esnasında A ve B noktalarına göre daha düşük sıcaklıklarda olan C ve D noktaları katılaşma esnasında da hızlı soğuma göstermelerinin nedeni diğer bölgelere nazaran daha ince cidarlı olması ve hub bölgesine uzak kalmalarıdır.

3.7.3. Kalıbın sıvı metal ile dolumu esnasında basınç değerlerinin değişimi

Jant kalıbı üzerinden alınan noktalarının dolum esnasındaki basınç (mbar) – zaman (s) grafiği Şekil 3.25.'de gösterilmektedir. Buradan anlaşılacağı üzere ergiyik metal besleme borusundan (yolluk) alınan noktada (E noktası) ilk basınç yüksek (1116 mbar) seviyededir. Yolluk girişinde basınç ihmal edilir seviyede düşüş ile 1111 mbar seviyesindedir. Spoke uçlarında en yüksek basınç (1120 mbar) görülmektedir. En düşük basınç (1081 mbar) ise rim kesitinin üst noktasında karşılaşılmaktadır. Ergiyik metal hub bölgesinden beslenmesiyle kalıp içerisine dolmaya başlamaktadır. Sıvı

metalin izlediği yol öncelikle hub bölgesi (D, C) ve çevresinden sonra spoke bölgelerine (B) doğru yayılmakta ve sonra rim bölgesini (A) doldurmaktadır. Spoke yüzeyleri boyunca sabit basınç hareketi ile kalıp dolmaya başlamaktadır. Sıvı metal akışı kalıp tabanını doldurduktan sonra yukarıya doğru katman katman yükselmektedir. Kalıp kesiti boyunca her katmanda farklı basınç değerleri gözlenmektedir. Özellikle üst katmanların daha düşük basınç seviyesinde olduğu görülmektedir. Yukarı doğru sıvı metal basıncı düşmektedir.

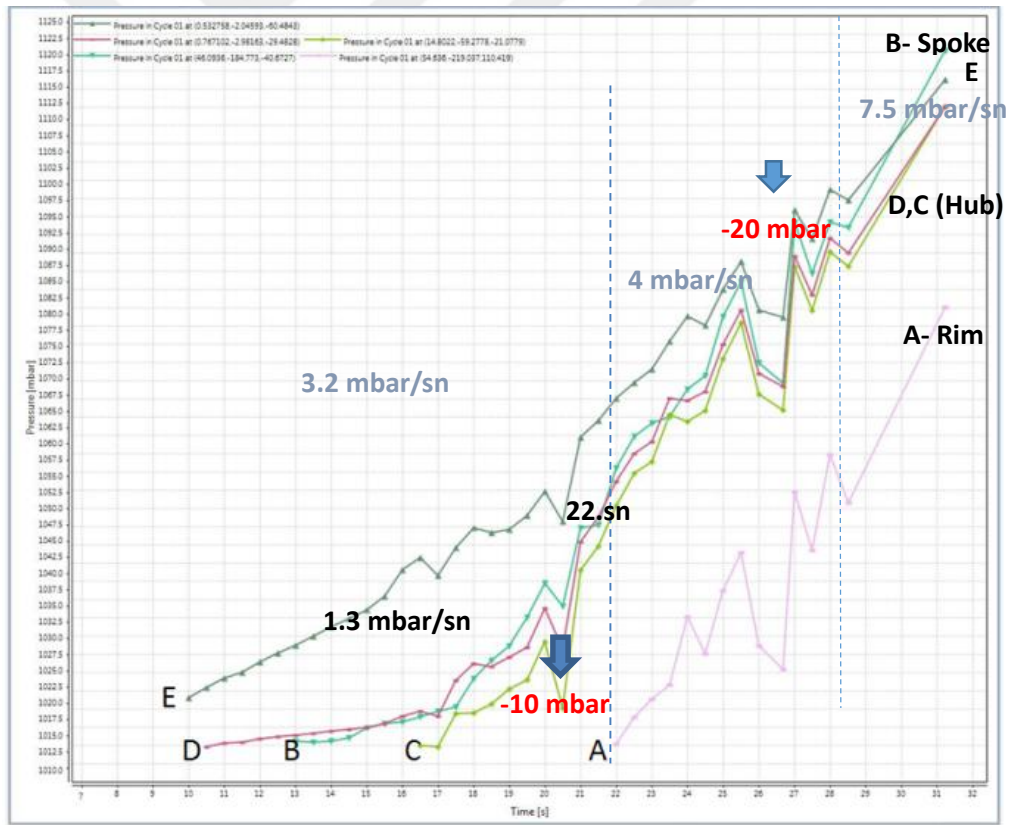


Şekil 3.25. Basınç ölçümü yapılan noktalar.

B noktasında basınç artışının temel nedeni, zamana bağlı olarak ergiyik metalin dolması ve üzerinde metal ağırlığının artması sonucu basınç seviyesinin artmasıdır. Bu nedenle ince kesitli ve karmaşık geometriye sahip olan spoke bölgesinde en yüksek basınç değerine ulaşılmaktadır.

C ve D noktaları aynı düzlemde ve yakın bölgede olmalarından kaynaklı olarak benzer basınç değerleri göstermişlerdir.

Şekil 3.26'ya genel olarak bakılacak olursa zamana bağlı olarak stabil olmayan inişli çıkışlı fakat artan bir basınç grafiği gözlenmektedir. A eğrisi 22. saniyede hub ve taban bölgesinin sıvı metal ile dolması sonrasında basınç oluşturmaktadır. A eğrisi döküm sonunda (31. sn) en düşük basınç (1081 mbar) sergilemektedir. Bunun nedeni; aşağıdan yukarı doğru sıvı metal beslemesi nedeniyle üzerinde ek bir basınç etkisinin (yerçekimi ve sıvı metal ağırlığı dışında) oluşmamasıdır. Buna karşın B,C,D (Spoke, Hub) ve E (yolluk) noktalarında ek bir sıvı metal sıkışma, akış basıncının etkisi görülmektedir. Bu etkinin en fazla görüldüğü nokta B noktasıdır. Yolluktan sıvı metalin çıkışına kadar (10. sn) basınç görülmemektedir. Kalıp boşluğunun dolmasıyla birlikte basınç artışı ivmelenmektedir. 3.2mbar/sn basınç artış ivmesi 7.5 mbar/sn seviyesine artış göstermiştir. Grafikte görüleceği üzere iki adet (mavi ok ile işaret edilen) basınç düşüşü (10-20mbar aralığında) gözlenmektedir.



Şekil 3.26. Sıvı metal basıncı için ölçülen noktaların P-t eğrileri.

BÖLÜM 4. KALIP KAPLAMA (POTELAJ) UYGULAMASI

Jant kalıbı alt ve üst kalıp maçası ile yan kalıp duvarlarından oluşan bir kalıp sistemidir. Kalıbın döküme hazırlığı aşamasında kalıp yüzeylerine potelay adıyla tanımlana sodyum silikat esaslı ticari kaplamalar uygulanmaktadır. Kaplanan kalıp parçaları birleştirilerek döküm makinesine monte edilmektedir. Kaplamanın kalıp yüzeyleri ve döküm parça üzerinde önemli fonksiyonları mevcuttur. Genellikle katılaşma kontrolü ve kalıptan dökümün ayrılmasında etkin rol oynamaktadır. Döküm prosesi esnasında kalıbın ısıtılması ve soğutulması nedeniyle kalıbın genleşme ve büzülme davranışları yanı sıra sıvı metal ile kalıp yüzeylerinin teması sonucunda ısı transferi, yüzey aşınması ve sıvı metal yapışması gibi problemler prosesi aksatmaktadır. Seri üretim yapan bir firma için bu kaplamanın ömrü proses verimliliğini belirlemektedir. Yüksek sayıda seri jant üretimi için birbirinin aynı döküm parçaları üreten ve metalden yapılmış kalıcı kalıplar kullanan bu tür döküm proseslerinde temel beklentiler: a.Daha iyi yapısal özellikler, b.Daha iyi döküm parça görünümü, c. Daha büyük boyutsal kararlılık, e,Parçanın besleme talebinin azalması, f. Daha yüksek üretim verimliliği, g. Daha düşük maliyetlerdir.

Döküm kalıbı kaplamalarının döküm prosesinin başarısında ki fonksiyonları aşağıda belirtilmektedir:

- Metal akışını kolaylaştırmak: sıvı metalin kalıbın her kesitine yeterli sıcaklıkta ve uygun akışkanlıkta ulaşmasını sağlamak yanında soğuk binme, yetersiz dolma gibi döküm hatalarının oluşumunun önlenmesi arzulanmaktadır.
- Daha iyi katılaşma sağlamak: döküm parçalarının kalıp içerisinde tamamen beslenebilmesini sağlamak için ısı transferinin kontrollü sağlanması gerekmektedir.

- Kalıptan kolay ayrılmaya yardımcı olmak: döküm parçaların katılaşma sıcaklığının biraz altında kalıptan çıkarıldığında, kalıp kaplamaları dökümün yüzeyden kolay ayrılmasını sağlamaktadır.
- Döküm parçasının yüzey kalitesi sağlamak: iyi parça yüzeyleri ve buna bağlı olarak da yüzey temizliği, ek işlem temizleme ve talaş kaldırma işlem maliyetlerinde azalmaya yardımcı olmaktadır.
- Daha uzun metal kalıp ömrü sağlamak: verimlilik artışı ve bakım maliyetlerinin azalmasına yardımcı olmaktadır.

Basınçlı dökümde, kalıp dizaynı, alaşım tipi, metal sıcaklığı önemli etkenler olması yanında kalıp yüzeylerine uygulanacak kaplama seçimi ve uygulama yöntemleri (fırça, daldırma, sprey) de en az yukarıdaki belirtilen faktörler kadar önem taşımaktadır.

Kalıcı kalıp kaplamaları tipik olarak taşıyıcı olarak kullanılan su, yüksek sıcaklıkta bağlayıcı madde (normalde sodyum silikat) ve refrakter dolgu ya da dolgu karışımları kullanılarak oluşturulur. İki kaplama sınıfı vardır:

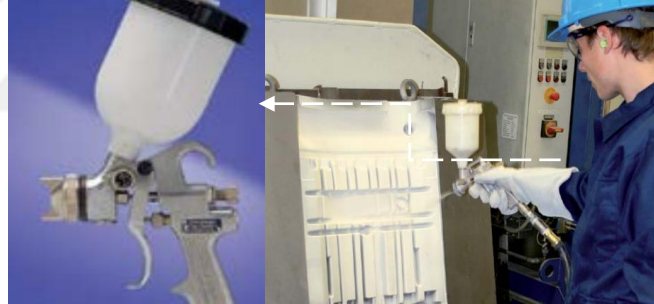
- Yalıtıcı: talk, mika, kizelgur, titanyum dioksit ve alümin gibi yalıtkan mineralleri içerisinde harmanlayan karışımlar içeren,
- Yağlayıcı: dökümün kalıptan çıkmasına yardımcı olmak üzere koloidal grafit ya da bor nitrür bazlı.

Bu doğrultuda ticari birçok döküm kalıbı kaplaması (POTEYAJ: Dolgu+Bağlayıcı+Su) kompozisyonu sektörde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

- Dolgu malzemesi olarak; TiO_2 , talk, mika, silika tozu, demir oksit, Al_2O_3 , zirkon, manyezit vb. refrakter esaslı tozlardan biri veya birkaçı kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımlarının normal döküm sıcaklığında (650-800°C) dolgu malzemelerin refrakterlik özellikleri ve kimyasal inertliğini korumaları gerekmektedir. Dolgu malzemelerinin kaplama yapısında fonksiyonu: termal iletkenlik, tanecik şekli ve boyutları gibi fiziksel özellikleri oluşturmaktır.

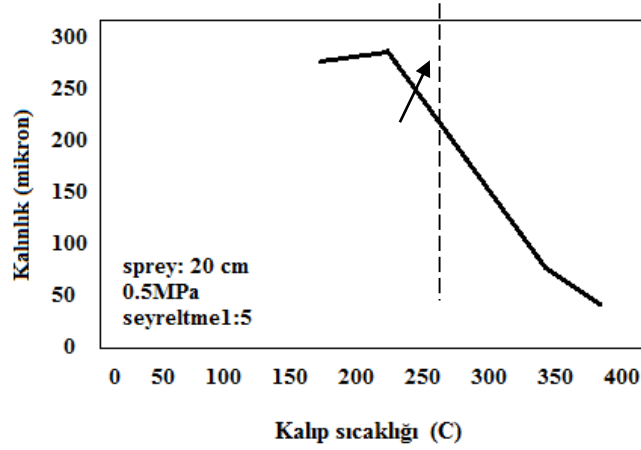
- Bağlayıcı malzemesi olarak; bentonit, reçine, borik asit, barit gibi yüksek sıcaklıkta bağlayıcı maddeler.
- Seyreltici olarak: belirli oranlarda alkol (örneğin izopropanol, etanol) ya da su olabilir

Poteyaj kaplamanın uygulanmasında en yaygın yöntem basınçlı hava tabancası ile sprej (Şekil 4.1.) yöntemidir. Uygulama esnasında kaplama tabakalarının sıklığı, termal yalıtım (izolasyon) özelliğini etkilemektedir; eğer tabaka çok sıkı değilse, partiküllerin arasında temas azdır (poroziteli) ve bu sebeple geçirgenlik ve yalıtım özellikleri yüksektir. Uygulama esnasında kalıp 100-250 o C (Poteyaj türüne bağlı) arasında bir sıcaklığa açık alev ile ön ısıtılmakta ardından sprej tabancası ile yüzey 90 açı ile belirli bir sprej 5mesafesi (10-25 cm) ile 0.5MPa (5 bar) basınç ile püskürtülmektedir. Gerektiğinde döküm kalıbının montajı esnasında da fırında 250 oC de 1 saat bekletilmektedir[38].



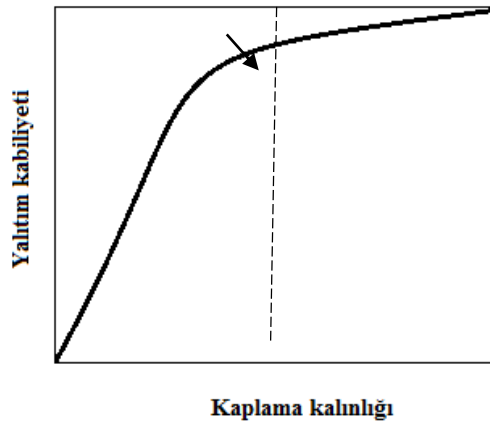
Şekil 4.1. Poteyaj sprej tabancası ve Poteyaj uygulaması esnasında[38].

Gerek kalıp sıcaklığı gerekse sprej mesafesi kaplamanın sıvı metal akışı esnasında poteyaj kaplamanın aşınmasını ve dolayısıyla da kalınlık kaybını etkilemektedir (Şekil 4.2.). Kaplama kalınlığı genel olarak 75-150mm arasındadır, belirli optimum kalınlık değerinin üzerine çıktığında iç gerilmeler nedeniyle yeterli kohezif direnci sağlayamamaktadır. Poteyaj kaplamanın kalınlığının azalması sonucunda kalıp ısı transferinin artması ile sıvı metalin kalıp yüzeylerine yapışmasını artırmakta ve yüzeyden poteyaj kaplamayı sökerek kaldırmasıyla kaplamanın aşınma hızı artarak kalıp ömrünü sınırlanmaktadır ve döküm kalitesi bozulmaktadır.



Şekil 4.2. Poteyaj kaplamalar için kalıp sıcaklığına bağlı aşınma etkisi ile kalınlık değişimi grafiği[38].

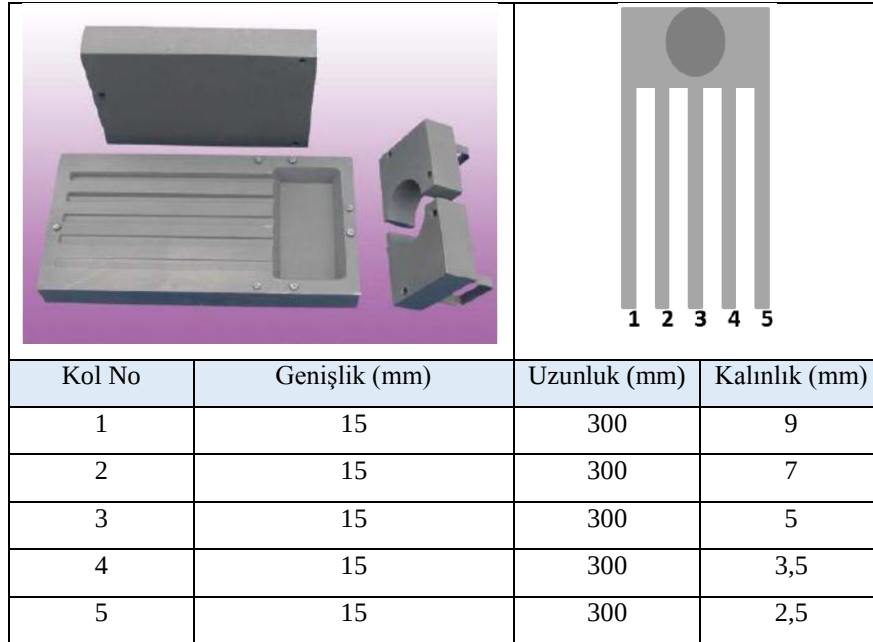
Genel bir kanı olarak termal yalıtım uygulamalarında etkin iki önemli faktör söz konusudur: a.Kaplama kalınlığı ve b. Porozite oranı. Poteyaj kaplama kalınlığının olabildiğince yüksek olması ve poroziteli olması yalıtım kabiliyetini artırmaktadır (Şekil 4.3.). Kalıp geometrisi nedeniyle belirli bir kalınlık seviyesinin üzerine çıkılamamaktadır. Bu nedenle özellikle kaplamalarda kimyasal kompozisyona bağlı olarak kaplamanın porozite oranı daha etkin rol oynamaktadır[38].



Şekil 4.3. Poteyaj kaplamanın kalınlığının yalıtım kabiliyetine etkisi[38].

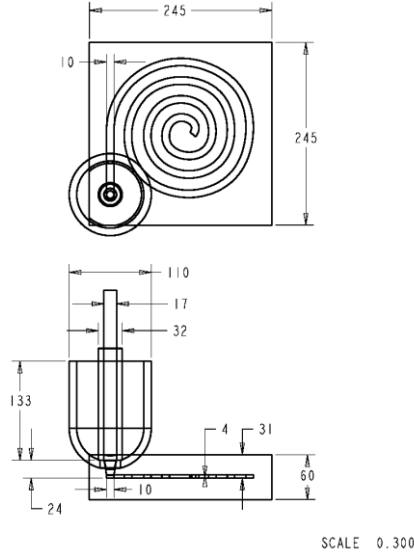
4.1. Sıvı Metal Akışkanlık Testi

Ergiyik haldeki döküm alaşımlarının akış özelliklerini tespit edebilmek amacıyla geliştirilmiş olan standart olarak farklı ölçü kalıpları bulunmaktadır. Aynı genişlik ve uzunluklarda farklı derinliklere sahip oluklar şeklinde (Şekil 4.4) veya aynı derinlikte ve daha uzun yolluğu bulunan spiral (double-spiral Şekil 4.5) şeklindeki kalıplar ile gerçekleştirilen bir uygulamadır. Bu test aracılığıyla sıvı metalin kalıbı doldurma kabiliyeti kontrol edilmektedir. Sıvı metal haznesine doldurulan sıvı metalin (1700 gr) kendi kendine kalıbı belirli bir süre içerisinde olukları doldurmasıyla test tamamlanmaktadır. Ampirik bir parametre olup bir metal veya alaşımın katılaşmadan önce standart bir akışkanlık test kanalı içindeki ilerleme uzunluğu ile belirlenmektedir. Akışkanlık testinin uygulandığı akışkanlık test kalıbı Şekil 38’de sergilenmektedir. Akışkanlık testi için metal kompozisyonu olarak alüminyum alaşımlı jant üretiminde sıkça kullanılan A356 alaşımı kullanılmıştır. Eritilen alüminyum alaşım sırasıyla 150 – 200 ve 300 °C’lere ısıtılmış olan kalıplara içinde seramik filtre bulunan yolluklar yardımıyla beslenmiştir. Deneyler sırasında sıvı metal sıcaklığı olarak 750 °C belirlenmiştir.



Şekil 4.4. Sıvı metal akışkanlık test kalıbı[38].

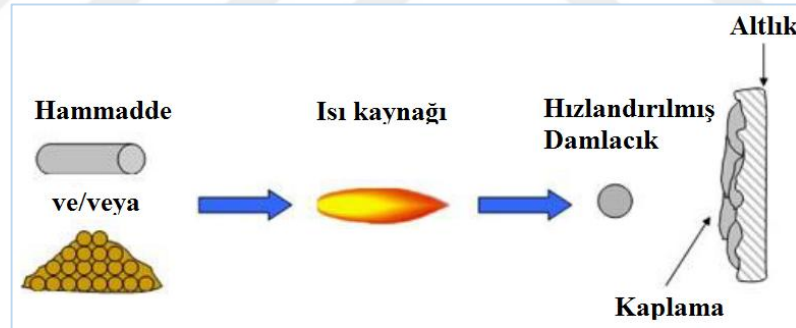
Double-spiral kanal genişliği $4 \times 10 \text{ mm}^2$, herbiri 3,5 tur dönmekte ve maksimum 1.2 m uzunluğun döküm yolu bulunmaktadır. Belirli standartları olan spiral test düzeneğinin formüle edilmiş parametreleri ile yapılmakta olan akışkanlık testi döküm sektöründe önemli bir analiz yöntemidir.



Şekil 4.5. Double-spiral akışkanlık testi sematik gösterimleri[39].

BÖLÜM 5. TERMAL SPREY KAPLAMA TEKNOLOJİSİ

Termal sprej, metalik veya metalik olmayan kaplamaların uygulanabildiği, bir grup kaplama teknolojisinin genel adıdır. Kaplama malzemesi (toz/tel) bir enerji kaynağı yardımıyla ısıtılır ve eriyik/yarı eriyik forma dönüştürülür ve ardından ivmelendirilen partiküller gaz veya atomizasyon jetiyle püskürtülmektedir. Önceden yüzeyi kumlama ile hazırlanmış altlık üzerine çarpan ergiyik damlacıklar hızla katılır ve splat (yassı katılmış tanecik) şeklini alarak birbiri üzerinde lamelli bir şekilde kaplama tabakasını oluşturur. Altlık ile kaplama birbirlerine mekanik ve/veya metalurjik olarak bağlanırlar [40]. Şekil 5.1.'de şematik olarak termal sprej kaplama prosesi gösterilmiştir.

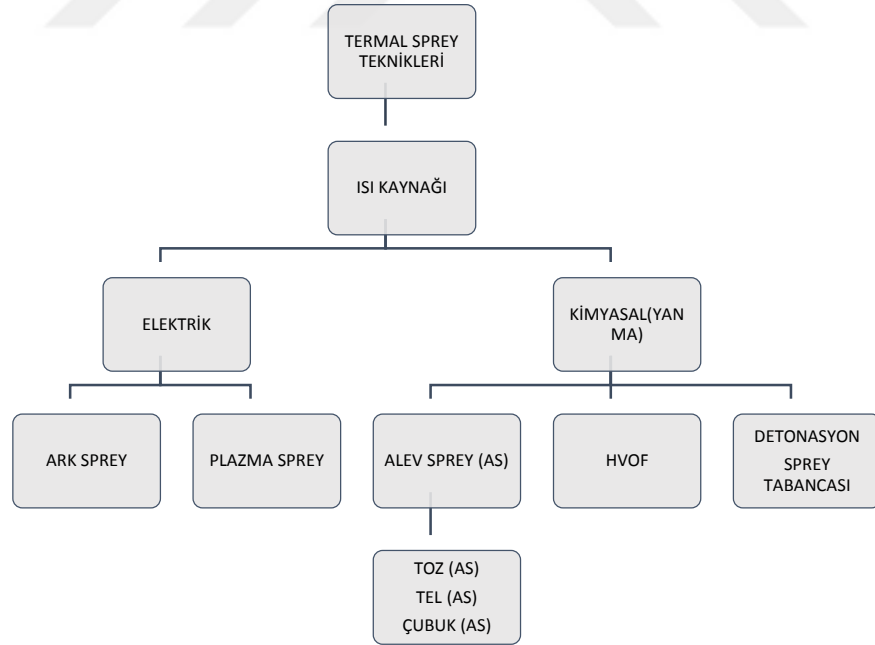


Şekil 5.1. Termal sprej kaplamanın şematik görünümü [40].

Termal sprej kaplamalar genel olarak korozyonu, abrazyon aşınmayı, erozyonu, engellemek, oksidasyonu ve sıcak korozyonu önlemek, ısı yalıtımı (Termal bariyer), amacıyla kullanılabilir. Bazı uygulamalarda yüzey yenileme ve onarma, son hale yakın üretim ve dekoratif amaçlarla da kullanılabilir [40]. Termal sprejin avantajları, hemen hemen tüm malzemeleri (metal, seramik, sermet, polimer) püskürtebilme yeteneğidir. Altlığa çok yüksek ısı girdisi olmaksızın uygulanabilmesi, parçanın ölçülerini ve özelliklerini değiştirmeden aşınmış veya hasara uğramış yüzeylerin yeniden kaplanabilmesidir [40].

5.1. Termal Sprey Kaplama Yöntemleri

Termal spreyc yöntemleri ısı kaynağı bakımından ikiye ayrılmaktadırlar. Bunlar elektrik ve kimyasal (yanma) olarak ifade edilmektedir. Isı kaynaklarına göre termal spreyc yöntemleri Şekil 5.2.'de gösterilmiştir. Ark spreyc ve Plazma spreyc enerjisini elektrik ark gücüne bağlı termal spreyc yöntemleridir. Yanma enerjisini ile gerçekleştirilen Alev spreyc en basit prosesdir ve alev sıcaklığı ile partikül hızı düşüktür. HVOF ve detonasyon spreyc tabancası ile çok yoğun, porozitesiz kaplama üretilebilmekte ve bu sayede yüksek yapışma mukavemeti elde edilebilmektedir. Soğuk spreyc HVOF'ten daha az termal enerjiye, daha fazla kinetik enerji ve hıza sahip yeni bir prosesdir [40]. Termal spreyc kaplama yöntemleri enerjilerine göre farklılık göstermektedir. Bu durum Şekil 5.3.'de gösterilmekte olan grafikte termal spreyc proseslerinin alev enerji eşikleri ve alev içerisindeki partiküllerin hızı hakkında bilgi verilmektedir. Alev spreyc diğer proses sistemlerle karşılaştırıldığında çok daha ucuz, basit, kullanışlı olması açısından endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Plazma spreyc ise yüksek sıcaklık uygulamalarında öne çıkan üstün bir kaplama teknolojisidir.



Şekil 5.2. Isı kaynaklarına göre termal spreyc kaplama yöntemleri [40].

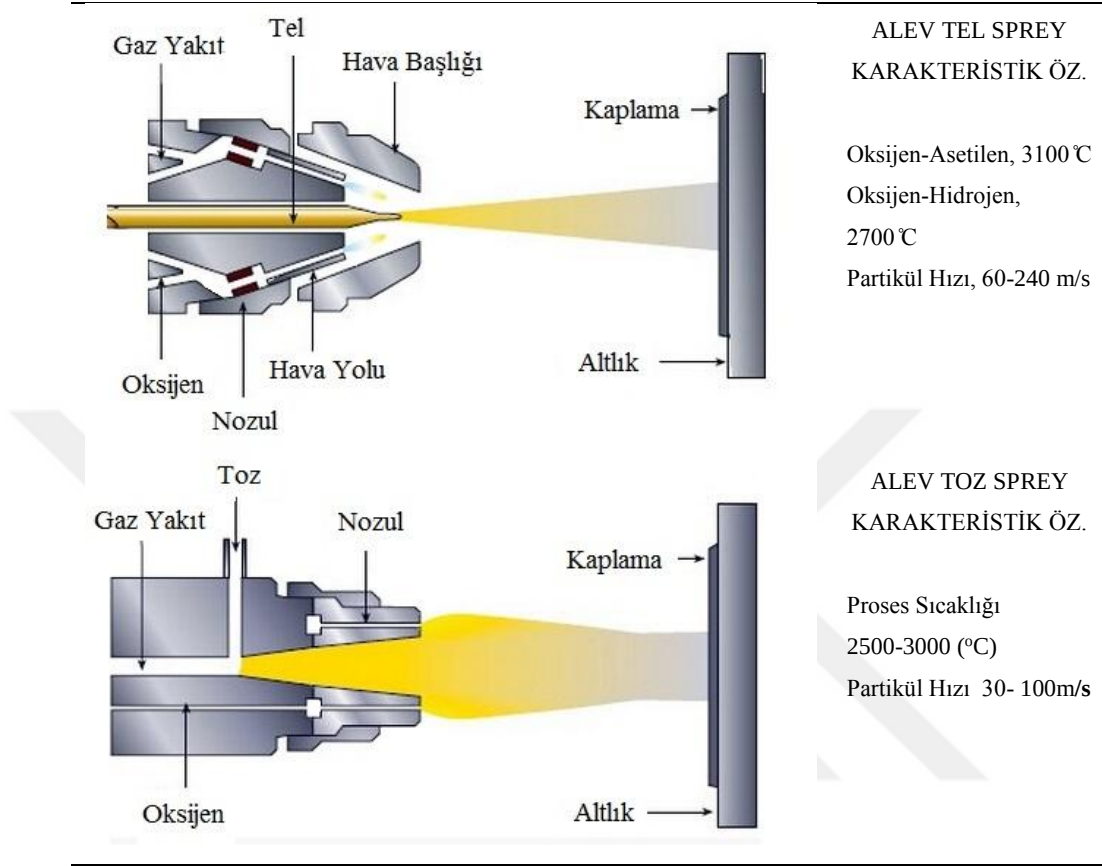
Proses / Özellik	Proses Partikül Hızı m/s	Proses Sıcaklığı (°C)
Soğuk sprej	800-900	500-900
Alev-toz	30-200	2500-3000
Alev-tel	30-100	2500-3000
HVOF	700-800	2500-3000
Plasma-APS	200-300	15000
Plasma-VPS	200-300	15000
Ark sprej	50-150	3000

Şekil 5.3. Termal sprej proselerinin alev sıcaklığı-partikül hızı grafiği [40].

5.1.1. Alev Sprej

Alev sprej kaplama sistemleri, seramik veya metalik toz, çubuk veya tellerin altlık malzemelerin üzerine kaplanması için, asetilen ve oksijen gaz karışımının yakıt olarak kullanılıp hava ile ergitilmiş toz ve metalik tozların altlık üzerine yönlendirilip mekanik ve metalurjik bir bağ kurarak yapışmasını sağlayan kaplama sistemleridir. Alev sprej yönteminde asetilen, propan veya hidrojen, oksijen ile birlikte yakılarak alev elde edilir, düşük basınçlı oksijen yakıt kaplama sistemidir [41]. Toz kullanılması durumunda toz alev sprej, tel kullanılması durumunda tel alev sprej adını almaktadır. Şekil 5.4.'de toz ve tel alev sprej yöntemi şematik olarak gösterilmiştir. Tel alev sprej prosesinde tel veya çubuk sprejde kullanılan torç ucunda yakıt gazı ve oksijen kombinasyonu ile alev oluşturulmaktadır. Dropletler hava basıncı ile atomize olmaktadır. Bu akış ile partiküller altlık malzemesine itilerek kaplama tabakası yüzeyde oluşturulmaktadır. Burada unutulmaması gereken durum, plazma sprej kaplama sistemine kıyasla alev sprej kaplama yönteminin mekanik özellikleri açısından yetersiz kaldığı ve temelinde adhezyon kuvveti zayıf, gözenekliliği yüksek kaplamalar elde edilebilmekte çoğunlukla yüksek gerilme altında çalışmayan yüzeylerde tamir ve korozyondan koruma amaçlı uygulamalarda tercih edilmektedir. Yüksek kalitede yüksek yapışma gerektiren uygulamalarda yüksek hızda alev sprej

(HVOF) veya plazma sprey prosesleri tercih edilmektedir. Kaplama yapısı yoğun ve oldukça yüksek aşınmaya dirençli kaplamalar üretilebilmektedir.

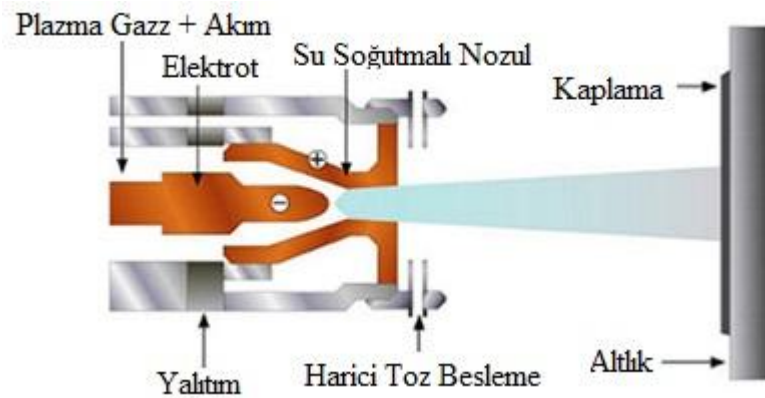


Şekil 5.4. Tel/çubuk alev spreyin şematik görünümü ve bölgeleri [41].

5.1.2. Plazma sprey

Plazma sprey prosesini diğer proseslerden ayıran en önemli özellikleri yüksek ergime sıcaklığına sahip seramik ve oksitleri eritme performansının yüksek ve uygulanabilirliğinin oldukça çok olması en etken faktörlerdendir. Bunun yanı sıra termal sprey proseslerini ayırt etmekte etken olan kaplama malzemesi olan tozların morfolojisi ve toz boyutları bakımından bu yöntem diğerlerine göre daha geniş sıklalara sahipken diğer termal sprey prosesleri bu uygulanabilirliğin gerisinde kalmaktadır. Buna karşılık tel/toz alev sprey ve ark sprey prosesleri basit ve ucuz prosesler iken plazma sprey daha kapsamlı ve alev ve ark spreye göre daha pahalıdır. Ancak kullanılan toz boyutu ve morfolojisi ile birlikte alev (jet) sıcaklığını belirlemede önemli parametrelerden olan ve kullanılan birçok inert gaz ile kullanılabilirlik

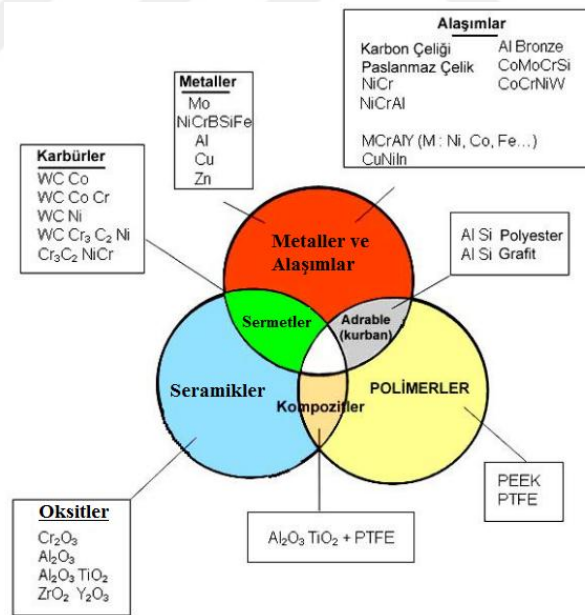
sunmaktadır. Diğer proseslere karşın plazma sprej daha fazla parametre sunabilmekte ve bununla birlikte APS (atmosphere plasma spray) VPS (vacuum plasma spray) LPPS (low pressure plasma spray) gibi farklılıklar göstermektedir. Bizim de laboratuvarımızda bulunan ve çalışmamızda kullandığımız atmosferik plazma sprej (APS) F4 MB tabancası Şekil 5.5’de iç dizaynı şematik olarak gösterilmektedir. Plazma sprej prosesinde gazlar tabancanın içerisinde bulunan anot ve katot arasından ilerler ve 20000 °C’yi ulaşan sıcaklıktaki yüksek voltajlı bir arkın içerisinde geçerken bu sıcaklıkta mevcut gazların çoğu (argon, helyum, azot, helyum veya bunların karışımları) bileşenlerine (elektronlar ve iyonlar) ayrışır ve iyonize olurlar. Oluşan yüksek sıcaklık nedeni ile gaz hacminde büyük bir artış olur ve gaz nozülünden yüksek hızlarda çıkar. Kaplama malzemesi olan tozu bir toz besleme ünitesi yardımı ile bu yüksek enerjili plazma jeti içersine atılmakta ve plazma jeti içerisinde ergitilen partiküller altlık malzeme üzerine gönderilmektedir. Küresel sıvı damlacıkları (droplet) yüksek hızlarda altlık malzeme yüzeyine çarptıkları zaman disk şeklinde yassılaşıır (splat) ve altlık malzemenin sıcaklığı düşük olduğu için splatlar katılaşırlar. Uygun tane konfigürasyonundaki (şekli, tane boyutu ve dağılımı) tüm malzemeler plazma spreyleme yöntemi kullanılarak yüksek kalitedeki kaplamalara dönüştürülebilir [40].



Şekil 5.5. Plazma sprej prosesinin şematik görünümü [40].

5.2. Plazma Sprey Yöntemi ile Üretilen Termal Bariyer Kaplamalar

Plazma gazlarının elektrik alanı içerisinde iyonizasyonu sonucu elde edilen yüksek enerjili plazma termal sprej ailesinin en önemli üyesidir. Açık atmosferde ve kontrollü atmosfer ortamında plazma tabancası ile püskürtülen yüksek ergime noktasına sahip metalik ve seramik esaslı kaplamalar (Şekil 5.6.). özellikle türbin parçaları, yanma odası parçaları, piston, kalıp yüzeylerinde; aşınmaya, oksidasyona, yüksek sıcaklığa, termal gerilmelere karşı koruma sağlamaktadır. Günümüzde plazma sprej kaplamaların en yoğun kullanım alanı termal bariyer amaçlı türbin parçaları üzerindedir. Çift katmanlı bu kaplamalar ısıya dirençli metal yüzeyin üzerinde MCrAlY bir bağ tabaka (termal genleşme uyumu ve yapışma dayanımını arttırmak için). Ve üzerine stabilize zirkonya esaslı seramik olan termal bariyer görevini üslenen bir tabakadan oluşmaktadır (Şekil 5.7.). 100 derecenin üzerinde yüksek termal yorulma etkilerine maruz kalan bu kaplamalar üstün performans sağlamaktadır [40].



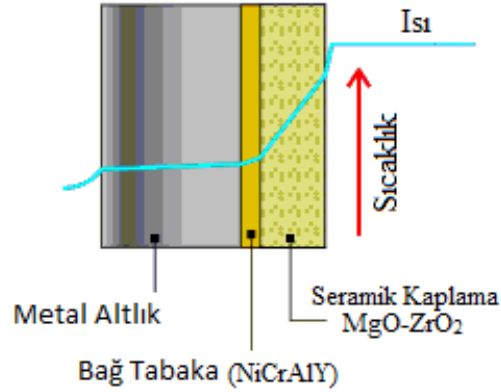
Şekil 5.6. Termal sprej kaplama sistemlerinde kullanılan toz kompozisyonlar [40].

Zirkonya esaslı seramik tabaka mikro yapısında porozite ve mikro çatlak oluşumlarına bağlı olarak düşük bir termal iletim katsayısına sahiptir bu özelliği üst tabakadan altlığa kadar kaplama kesiti boyunca 100 ila 200 derece aralığında yalıtım kabiliyeti sağlamaktadır. Kaplama kalınlığı ve mikro yapı özellikleri kontrol edilerek termal çevrimlere karşı dayanıklı ve uzun ömürlü bir kaplama elde edilmektedir [40]. Genel olarak termal bariyer kaplamalarda Y_2O_3 ile CeO_2 , MgO , CaO stabilize zirkonya esaslı seramik toz formundaki malzemeler plazma sprej teknolojisi ile yüzeye tatbik edilmektedir. Stabilizasyonun temel amacı saf zirkonyumun yüksek sıcaklıklarda faz dönüşümüne mağruz kalması ve hacimce genişerek çatlak oluşumuna neden olmasıdır.

Y_2O_3 ve CeO_2 yüksek maliyetli seramik tozlar olmaları ile MgO ile stabilize zirkonya esaslı kaplama tozları termal bariyer kaplama malzemesi olarak bu çalışmada kullanılması hedeflenilmiştir. $MgO-ZrO_2$ esaslı kaplamalar termal şoklara termal çevrimlere direnç gösterebilmekte, yüksek sıcaklıklarda stabilizesini koruyabilmekte bunun yanında ergiyik metal ile yapışma özellikleri zayıftır literatür araştırmalarında basınçlı döküm kalıplarında ortalama 400mm kalınlığında $MgO-ZrO_2/NiCrAlY$ esaslı yüksek poroziteli termal bariyer kaplamaların kullanılabildiği gözlenmiştir. EP 1171253B1 kodlu patentte polimer katkılı termal bariyer kaplamalar üzerinde yapılan çalışmalarda %30-60 oranında porozite içeren düşük termal iletkenliğe sahip termal bariyer kaplamalar üretilmiş ve test edilmiştir. Bu tez çalışmasının motivasyonu termal sprej yöntemleri ile $MgO-ZrO_2$ esaslı kaplamaların mevcut durumda kullanılan ticari (poteyaj) kaplamalara alternatif olarak kullanılma potansiyelinin araştırılması ve kaplama özelliklerinin karşılaştırmalı olarak test ve analizlerini kapsamaktadır.

Termal bariyer kaplamalar, malzemenin çalışma sıcaklığını yükselterek sistemin verimini arttırmak amacı ile kullanılır. Genelde ısıya dirençli metal alt tabakanın üzerine homojen bir bağ tabaka+seramik kaplama şeklinde uygulanmaktadır. Bu tür kaplamalarda çalışma esnasında görülen en önemli problem, metal alt tabaka ile seramik kaplamanın termal genişleme sabitlerinin farklı olması nedeniyle ortaya çıkan büyük termal gerilmelerdir. Bu gerilmeler sonucunda sistemde çatlaklar ve

metal/seramik ara yüzünde ayrılmalar görülmektedir. Bunu engellemek için bağ kaplama (MCrAlY) tabakası uygulanmak zorundadır [40].



Şekil 5.7. Termal bariyer kaplama katmanlarının şematik görünümü[40].

5.2.1. Zirkonya Esaslı Seramikler

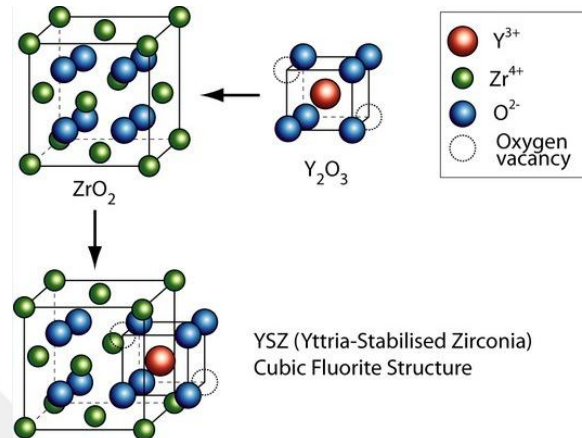
Bir oksit seramik olan ZrO_2 : sahip olduğu çok yüksek ergime sıcaklığı, ve mükemmel korozyon direnci, düşük termal genleşme ve iletkenlik ile yüksek sıcaklıklarda iyonik iletkenlik gibi üstün özellikleri nedeniyle günümüzde üzerinde en fazla araştırma yapılan ileri seramik malzemelerden birisidir (Stevens, 1986). Saf ZrO_2 , üç adet iyi bilinen polimorfa sahiptir: monoklinik (m), tetragonal (t) ve kübik (k). Bu üç polimorf hemen hemen aynı kristal yapıya ve benzer kimyasal bileşimlere sahiptir (Şekil 5.8.). ZrO_2 yapısında hangi polimorfun bulunacağı, sıcaklığa ve basınca bağlıdır. Saf zirkonyum oksit oda sıcaklığında stabil olarak monoklinik fazında bulunmaktadır ve sıcaklığa bağlı olarak faz değişikliğine uğramaktadır.

Bunlar ;

Monoklinik (1173 C) → tetragonal (2370 C) → kübik (2690 °C)

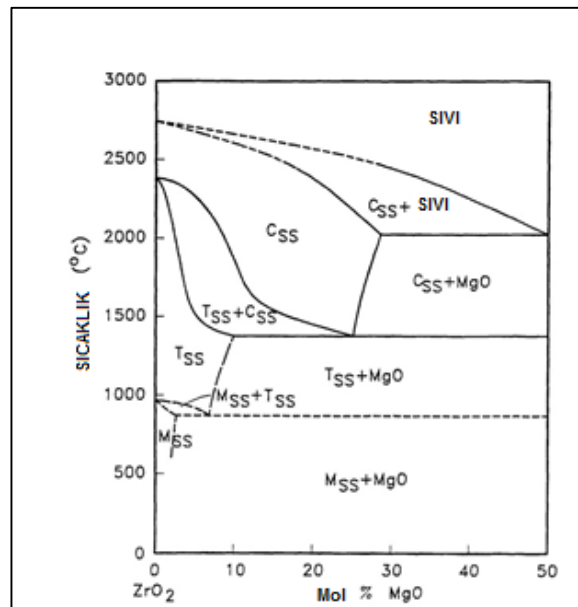
Bununla birlikte saf zirkonyum yüksek sıcaklıklarda kullanılabilmesi için bazı elementler (Y_2O_3 , CaO , Ce_2O_3 , MgO , Al_2O_3 ,) ile tetragonal ve/veya kübik faza dönüştürülerek stabilize edilmektedir. Endüstride yoğun olarak yttria ile stabilize

edilmiş zirkonyum (YSZ) esaslı termal bariyer kaplamalar kullanılmaktadır. Genel olarak Y_2O_3 (%4-8) oranında stabilize edilen zirkonyum iki şekilde standart isimlendirilmesi yapılmaktadır.. Stabilize edilmiş kristal kafes sistemi Şekil 5.8.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.8. ZrO_2 ve Y_2O_3 şematik kristal kafes sistemi.

Magnezyum oksit ilavesi ile stabilize olan zirkonyum (MSZ) genel olarak MgO (%8-16-21) oranında stabilize edilen zirkonyum kullanılmaktadır. MSZ'nin faz diyagramı Şekil 5.9.'da gösterilmektedir.



Şekil 5.9. MSZ'nin faz diyagramı.

BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Toz Karışımlarının Hazırlanışı

Deneysel çalışmalar kapsamında Magnezyum Stabilize Zirkonya tozu (MSZ) ve toz karışımları kullanılarak sıcak iş kalıp çeliği H13 (DIN 1.2344) plakalar ve sıvı metal akışkanlık test kalıbı alev sprej ve plazma sprej kaplama yöntemleriyle kaplanmıştır. Kaplamada kullanılacak olan MSZ tozları gerekli akışkanlığı sağlayabilmesi amacıyla 3 saat 120 °C’de etüvde kurutulmuş ve turbula karıştırıcıda 2 saat karıştırılmıştır. Karışım tozlarının hazırlanması prosesinde ise MSZ tozuna ek olarak ağırlıkça %3 BN tozları alınarak 30:1 bilye/toz oranında turbula karıştırıcıda kuru ortamda 48 saat karıştırılmış ve 120 °C’de kurutulmuştur. Bir sonraki aşamada eklenen teflon tozları ise MSZ ve %3 BN toz karışımına ağırlıkça %5 ve %10 oranlarında aynı işlem süreçlerinin uygulanmasıyla eklenmiştir. Kaplama uygulanacak H13 çelik plakalar 30×30×3 mm boyutlarında kare levhalar halinde kesilerek kaplama işlemlerine hazırlanmıştır. Kaplama numunelerinin hazırlığı aşamasında, altlık yüzeyleri önce alkol ile temizlenerek kumlama işlemine maruz bırakılmıştır. Kumlamadan sonra beklemeden yüzey kaplama aşamasına geçilmiştir. Kaplama işlemlerinde kullanılan tozlar ve toz karışımları Tablo 6.1.’de verilmektedir.

Tablo 6.1. Kaplama işleminde kullanılan toz karışımları.

Kaplama Tozları	MSZ
	MSZ+BN%3
	MSZ+BN%3+PTFE%5
	MSZ+BN%3+PTFE%10

6.2. Alev Sprey Kaplama İşlemi

Yüzey hazırlıkları bitirilmiş olan altlık malzemeler tutuculara yerleştirilerek kaplama işleminden önce yaklaşık 150 °C'ye ısıtılmıştır. Isıtma işleminden sonra malzemede seramik kaplama ile altlık malzeme arasında termal genleşme farkını indirmek amacıyla CoCrNiAl tozu ile altlık malzeme üzerine ortalama 20 ± 10 µm bağ tabaka kaplaması uygulanmıştır. Kaplama işlemlerinde Oerlikon Metco marka Magnesium Stabilized Zirconia (MSZ) tozları ve bu tozlara farklı oranlarda Boron Nitride (BN) ve Teflon (PTFE) tozlarının ilave edilmesi ile hazırlanmış olan tozlar kullanılmıştır. Kaplama parametreleri, Oksijen 30 NLPM, Asetilen 12,5 NLPM ve Hava 150 NLPM olarak seçilmiş ve püskürtme yaklaşık 12 cm mesafeden gerçekleştirilmiştir. Herbir kaplama tozu için ortalama 150 ± 50 µm kaplama kalınlığında kaplamalar elde edilmiştir. Kaplama tozları ile kaplanan numune isimleri Tablo 6.1.'de sergilenmektedir.

6.3. Plazma Sprey Kaplama İşlemi

Kumlama uygulanarak kaplama işlemine hazırlanmış olan numuneler tutuculara yerleştirilerek, robotik kolun programlanmasıyla 2 paso ısıtma işlemi ardından 2 paso CoCrNiAl bağ tabaka kaplaması uygulanmıştır. Daha sonra toz değişimi yapılarak seramik kaplamalar oluşturulmuştur (10 paso). Kaplama parametreleri, Argon 45 NLPM, Hidrojen 10 NLPM ve hava 2 bar basınç olacak şekilde ayarlanmıştır. Sisteme uygulanan gerilim 70 V ve 600 A akım şeklinde olup 12 cm püskürtme mesafesi olacak şekilde ayarlanmıştır. Yaklaşık 150 ± 50 µm kaplama kalınlıkları oluşturulmuştur. Kaplama işleminde kullanılmış olan toz karışımları ve kaplanmış numunelerin isimlendirilmesi Tablo 6.2.'de sergilenmektedir.

Tablo 6.2. Kaplama numunelerinin kodlanması.

Kaplama tozu karışımı	Alev sprej-AS	Plazma sprej-PS
MSZ	AS-M	PS-M
MSZ+BN%3	AS-MB	PS-MB
MSZ+BN%3+PTFE%5	AS-MBP ₅	PS-MBP ₅
MSZ+BN%3+PTFE%10	AS-MBP ₁₀	PS-MBP ₁₀

6.4. Test Analiz ve Karakterizasyon Çalışmaları

Deneysel çalışmalarda kullanılan tozlar lazer partekül toz analiz cihazı ile analiz edilerek toz boyutları ve ortalama dağılımları tespit edilmiştir. Tozların morfolojik yapısı taramalı elektorn mikroskobunda (SEM) farklı büyütme oranlarında incelenerek tozun şekli ve morfolojik yapısı incelenmiştir(Şekil 6.1.). Toz malzemelerin kristal yapısı RİGAKU D/Max 2200 PC markalı XRD cihazında 10 ila 80 derece aralığında 0.1/sn hızda bakır alfa radyasyonu ile analiz edilmiştir(Bragg kanuna göre).



Şekil 6.1. Toz analizi cihazı ve SEM cihazı resimleri.

Deneysel çalışmalarda üretilen kaplamamalar mikroskobuk açıdan incelenmiş üst yüzey ve kesit morfolojisi taramalı elektron mikroskobunda görüntülenmiştir. Kaplama kesitinden metalografik hazırlık sonrası elde edilen kaplama kesitleri üzerinden kaplama kalınlık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. En az 6 ölçüm alınarak ortalamaları alınmıştır. Kaplamaların üst yüzey pürüzlülük özellikleri profilometri cihazında Ra Rz Rmax değerleri 3 yatay eksen ve 3 dikey eksen üzerinde ölçüm alınarak ortalamaları hesaplanmıştır. Kaplamanın mekanik dayanımı mikro sertlik cihazında vickers uç 300 gr yük altında 15sn 6'şar ölçüm alınarak ortalamaları alınmıştır.



Şekil 6.2. Çekme test cihazı ve mikro sertlik cihazı.

Kaplamaların yüzey ıslatma kabiliyetini amacıyla temas açılarının ölçümleri 6 ölçüm alınarak gerçekleştirilmiş (kruss). Sıvı metalin akışkanlık test kalıbında ergiyik metalin farklı kalıp sıcaklıklarında kalıp içersindeki hareket mesafesini ve kalıbı doldurma oranı ölçülmüştür. Kaplamaların yapışma testi astm 633C esas alınarak 0,013 mm/sn çekilmek suretiyle test edilmiştir (Şekil 6.2.). Bölüm 7’de deneysel çalışmalar ayrıntılı bir şekilde tartışılmıştır.

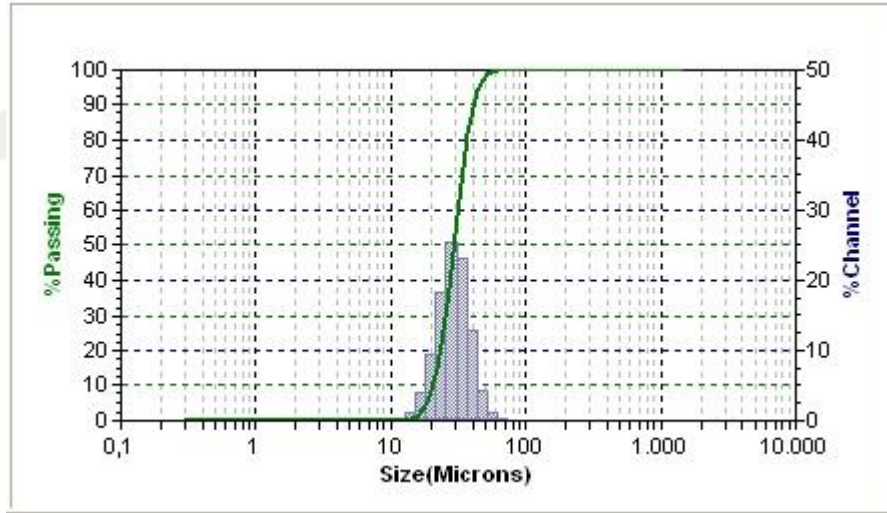


Şekil 6.3. Termal sprey multi tabanca kabini, alev sprey tabancası ve plazma sprey tabancası.

BÖLÜM 7. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

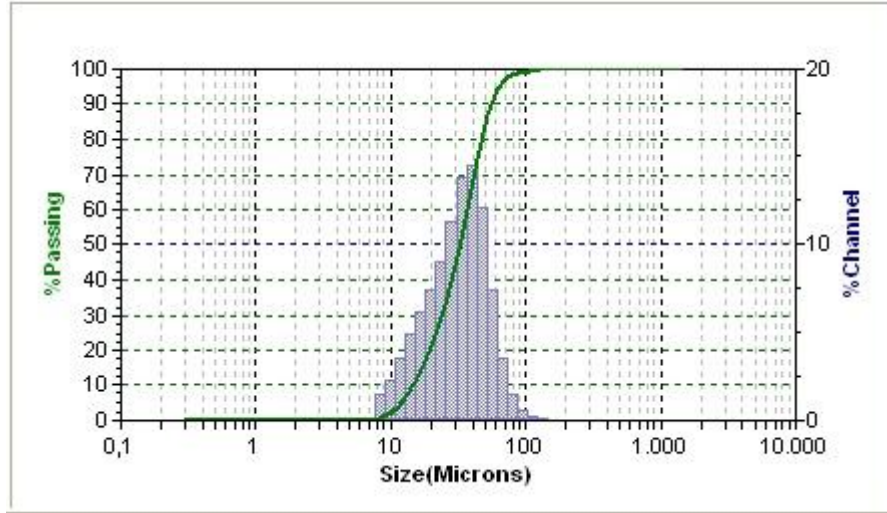
7.1. Kaplama Tozlarının Toz Boyut Dağılımları

Kaplama işlemlerinden önce bağ tabakasının oluşturulmasında kullanılan Co-210 ticari koduyla temin edilmiş CoCrNiAl tozlarının ortalama toz boyut dağılımlarını veren grafik Şekil 7.1.'de sergilenmektedir. Grafikten anlaşılabacağı üzere bağ tabakasının oluşturulmasında kullanılan bu tozlar ortalama $50 \pm 5 \mu\text{m}$ toz boyutunda olup toz boyutu dağılımı oldukça dar bir dağılım göstermektedir.



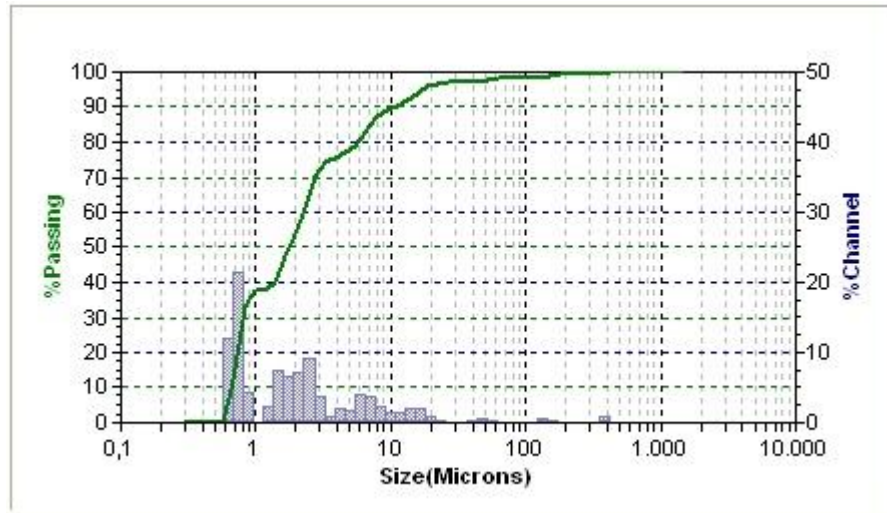
Şekil 7.1. CoCrNiAl esaslı bağ tabakası tozlarının toz boyut dağılımlarını veren grafik.

Kaplama işlemlerinde kullanılan ZRO-103 ticari kodlu MSZ tozunun ortalama toz boyut dağılımlarını veren grafik Şekil 7.2.'de sergilenmektedir. Grafiğe göre kullanılan MSZ tozlarının ortalama $75 \pm 5 \mu\text{m}$ toz boyutuna sahip olduğunu ve 10-100 μm arasında bir toz boyut dağılımına sahip olduğunu söylemek mümkündür.



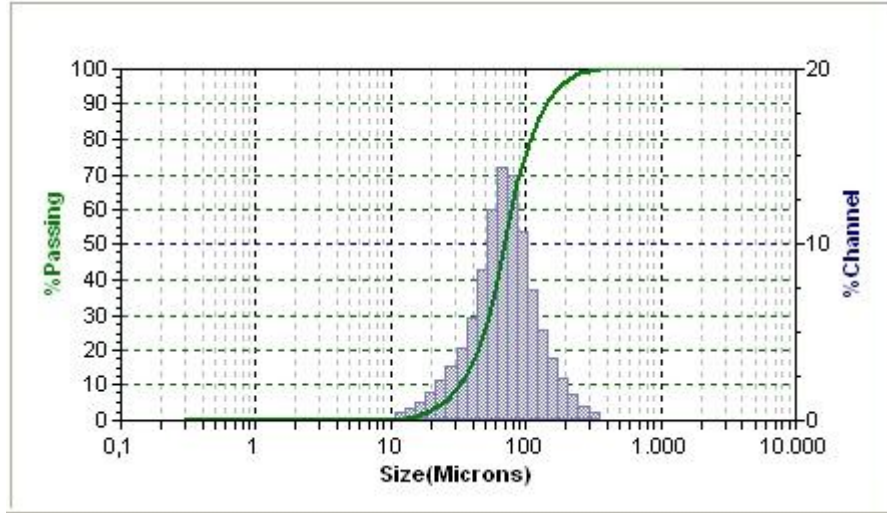
Şekil 7.2. Kaplama işlemlerinde kullanılan MSZ tozlarının ortalama toz boyutu ve toz boyut dağılımını gösteren grafik.

Kaplama işlemlerinde ağırlıkça %3 oranında karışım tozlarına ilave edilen Bor Nitür tozlarının toz boyut dağılımlarını veren grafik Şekil 7.3.'de sergilenmektedir. Grafikten anlaşıldığı üzere tozların boyutları $1\ \mu\text{m} <$ boyutlarında olup geniş bir toz boyutu dağılımına sahiptir.



Şekil 7.3. BN tozlarının toz boyutu dağılımlarını gösteren grafik.

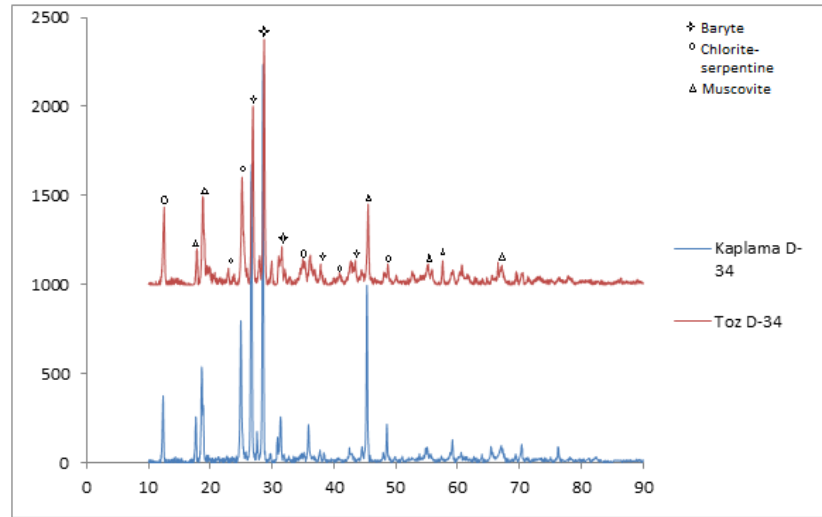
Kaplama karışım tozlarına ağırlıkça %5 ve %10 oranlarında ilave edilen PTFE tozlarının ortalama toz boyut dağılımlarını gösteren grafik Şekil 7.4.'de sergilenmektedir. Grafiğe göre PTFE tozları $80 \pm 5\ \mu\text{m}$ toz boyutuna sahiptir.



Şekil 7.4. PTFE tozlarının toz boyut dağılımlarını gösteren grafik.

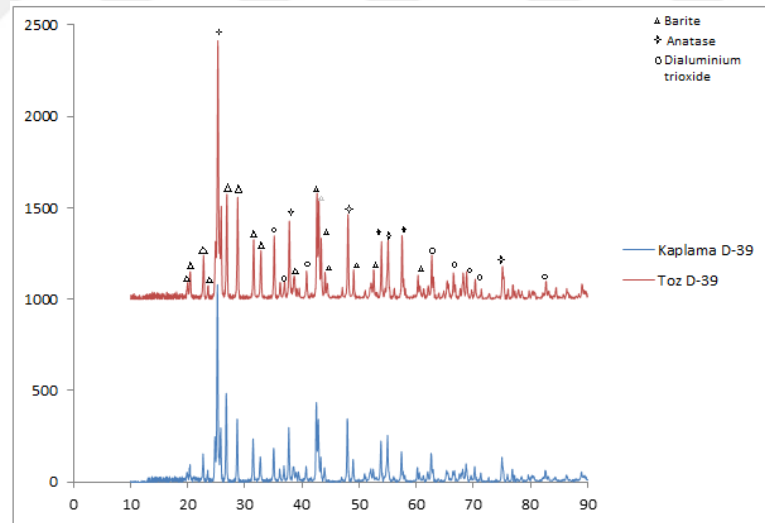
7.2. Poteyaj Kaplamaların Toz Formunda XRD Analizleri

Önceki çalışmalarda poteyaj kaplanmış olan numuneler üzerinden alınan XRD analizlerine ek olarak bu dönem kaplamada kullanılan poteyaj sıvıları kurutulup öğütülmüş ve toz haline gelen D-34, D-39 ve D-140'tan tekrar XRD analizleri yapılmıştır. Kaplama halinde elde edilmiş olan sonuçlar ile toz haline getirilmiş haldeki XRD sonuçları her bir ticari kaplama malzemesi için tek tek üst üste getirilerek incelenmiştir. Ticari kodu D-34 olan poteyaj malzemesinin XRD analizleri Şekil 7.5.'de sergilenmektedir. XRD piklerinin verdiği sonuçlara göre kaplama malzemesinin yapısında Muscovite ($\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$), Barite (BaSO_4) ve Chlorite-serpentine ($\text{MgAl}_6(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$) fazları bulunmaktadır. Kaplamalardan alınan XRD sonuçlarıyla kıyaslandığında tozlardan elde edilen pikler daha şiddetlidir.



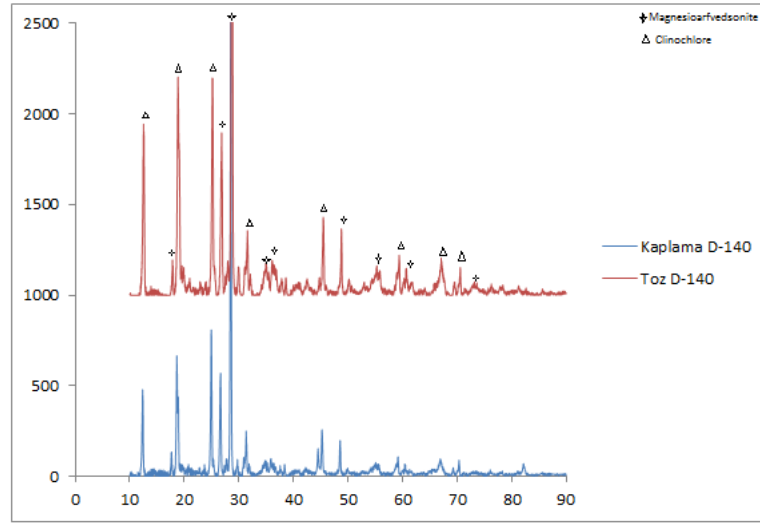
Şekil 7.5. D-34 poteyaj kaplama malzemesinin kaplama ve toz halindeki XRD sonuçları.

D-39 ticari koduna sahip poteyaj kaplama malzemesinin kaplama ve toz halindeki XRD sonuçları Şekil 7.6.'da sergilenmektedir. XRD analizlerine göre yapıda Barite (BaSO_4), Anatase (TiO_2) ve Dialuminium trioxide (Al_2O_3) fazları bulunmaktadır.



Şekil 7.6. D-39 koduna sahip poteyajın kaplama ve toz halindeki XRD analizleri.

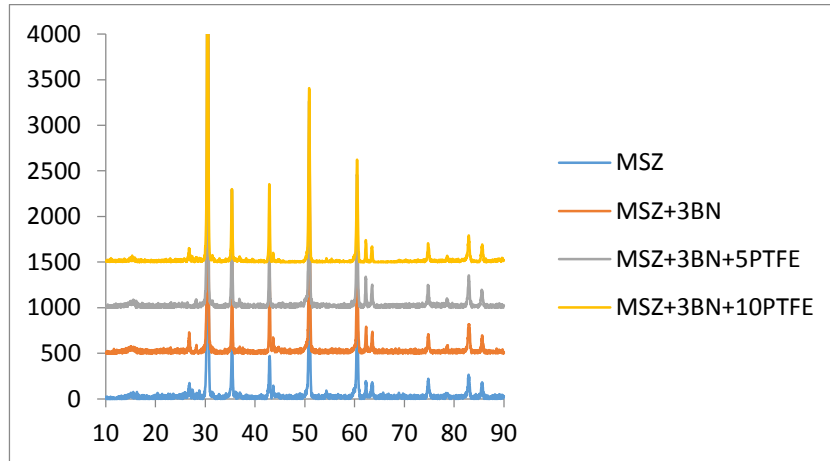
D 140 ticari koduna sahip poteyaj malzemesinin kaplama ve toz halinden alınan XRD sonuçları Şekil 7.7.'de sergilenmektedir. XRD analizlerinden elde edilen piklere göre yapıda Magnesioarfvedsonite ($(\text{Na}, \text{K})_3(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Al})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{F}, \text{OH})_2$) ve Clinocllore ($(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_6(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$) fazları mevcuttur.



Şekil 7.7. D-140 poyetaj malzemesinin kaplama ve toz hali üzerinden alınan XRD sonuçları.

7.3. Kaplama Tozlarının XRD Analizleri

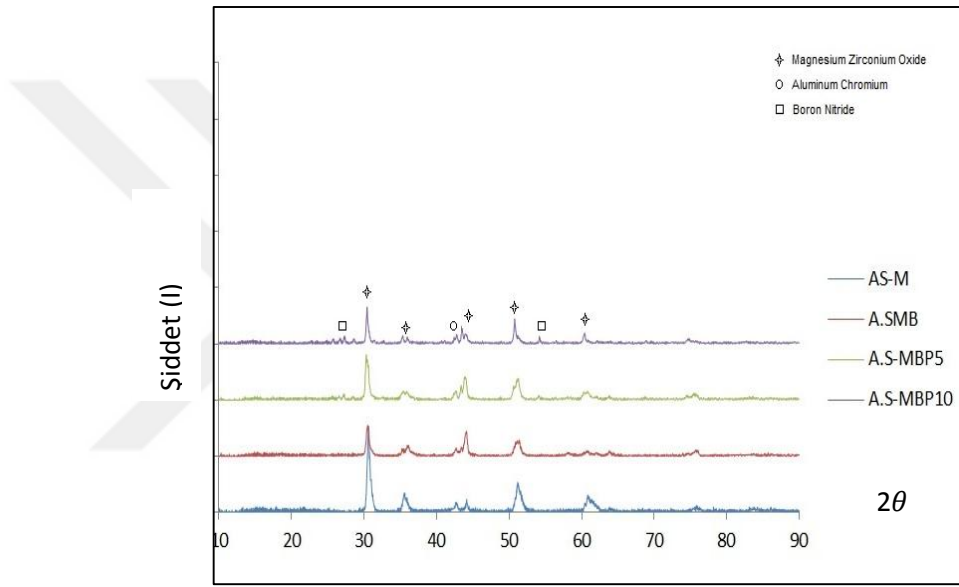
Alev sprej ve plazma sprej kaplama işlemlerinde kullanılan kaplama tozlarının XRD analizleri sonucunda elde edilen pikler Şekil 7.8’de sergilenmektedir. Elde edilen patern çizgilerine göre yapılarda MSZ ve MgO fazlarına ek karışım tozlarında küçük pikler şeklinde Bor Nitrür fazı görülmüş olup, PTFE fazından kaynaklanan farklı pike rastlanmamıştır.



Şekil 7.8. Kaplamada kullanılan tozların XRD faz analizleri.

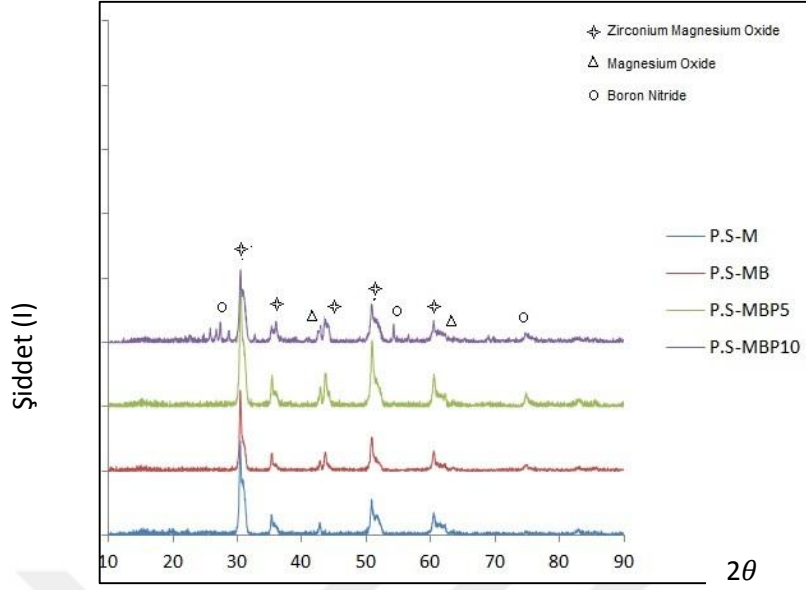
7.4. Kaplama Uygulanmış Numunelerin XRD Analizleri

Alev sprej kaplama uygulanmış olan test numuneleri üzerinden alınan XRD paterni Şekil 7.9.'da sergilenmektedir. Elde edilen pikler, tozların XRD piklerinden farklı bir davranış göstermiş olup, yüksek oranda amorflaşma olduğu dikkat çekmektedir. Ayrıca kaplamanın çok birikmediğini düşündüren PTFE katkılı numunelerde bağ tabakasından geldiği düşünülen Alüminyum Chromium pikleri ile karşılaşılmıştır. Kaplama yapısı genel olarak Magnesium Zirconium Oxide yapısından oluşmaktadır.



Şekil 7.9. Alev sprej kaplama uygulanmış test numuneleri üzerinden alınan XRD paternleri.

Plazma sprej kaplama uygulanmış olan kaplama numuneleri üzerinden alınan XRD paternleri Şekil 7.10.'da sergilenmektedir. XRD piklerinden anlaşıldığı üzere kaplamalar alev sprej kaplamalara benzer paternler vermiş olup yapıda amorflaşma alev sprej kaplamadan daha fazla oranda görülmüştür. Bunun sebebinin plazma sprej kaplamada alev sprej kaplamaya göre daha yüksek sıcaklıklara çıkılmış olmasını göstermek mümkündür. Yapıda Zirconium Magnesium Oxide ve Magnesium Oxide pikleri ağırlıklı görülmektedir.

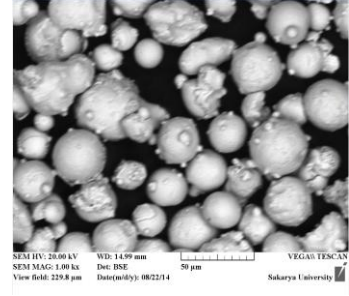
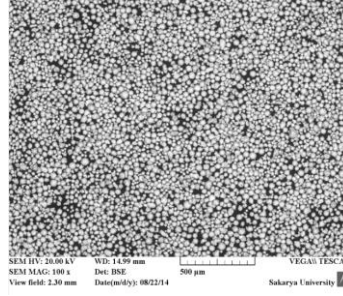
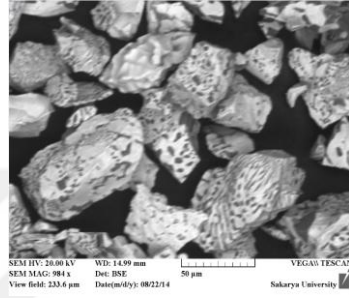
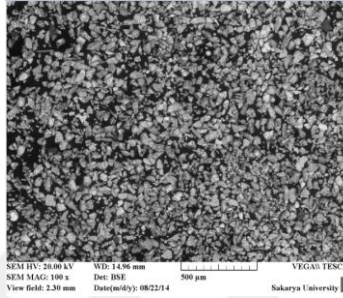
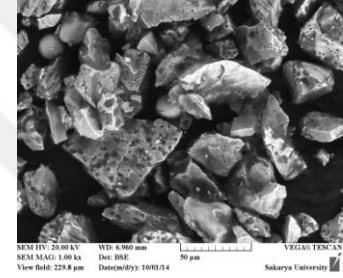
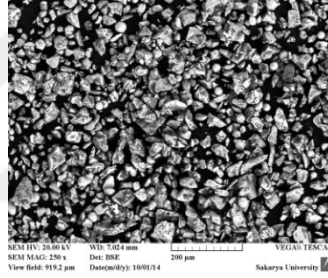
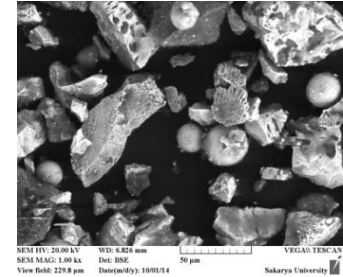
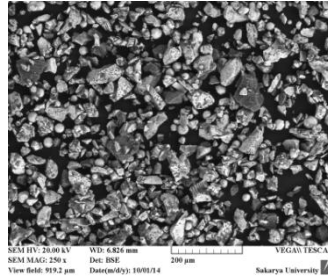
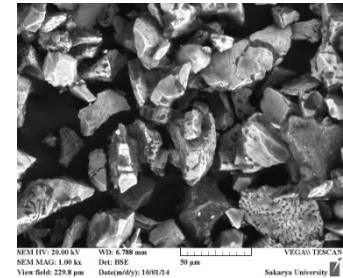
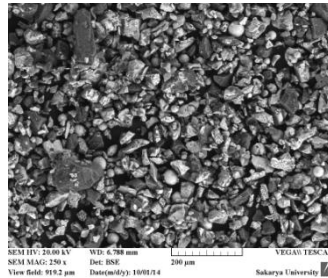


Şekil 7.10. Plazma spreyl kaplama uygulanmış olan test numuneleri üzerinden alınan XRD paternleri.

7.5. Kaplama Tozlarının SEM Analizleri

Alev spreyl ve plazma spreyl kaplama uygulamalarında bağ tabaka ve seramik tabaka kaplama malzemesi olarak kullanılan tozlarının SEM morfolojileri Tablo 7.1’de sergilenmektedir. Bağ tabakada kullanılan CoNiCrAl tozlarının küresel şekilli ve yaklaşık 10-25 µm ortalama tane boyutuna sahip olduğunu söylemek mümkündür. Partiküllerin ortalama çaplarının 13 µm olduğu görülmüştür ve küçük partiküller ile daha büyük olan partiküller arasında boyun verme ve birleşmeler gerçekleştiği görülmektedir. EDX analizlerinde beklendiği üzere Co, Cr, Ni, Al ve eser miktarda C elementleriyle karşılaşılmıştır. kaplama uygulamalarında kullanılan magnezyum stabilize zirkonyum (MSZ) ticari seramik tozunun morfolojisi, keskin köşeli, karmaşık şekle sahip ve yaklaşık olarak 50-80 µm ortalama tane boyutuna sahip bir dağılım göstermektedir. EDX analizlerine göre, yapıda Zr, Mg, O ve eser miktarda Al olduğu görülmüştür. Ayrıca SEM görüntülerinde karşılaşılan açık ve koyu renk desenli bölgelerde açık renkli kısımlar zirkonyumca zengin iken, koyu renkli bölgelerde O ve Mg ağırlıklıdır. MSZ tozlarının yanında BN tozları çok küçük görünmektedir. MSZ tozları gibi BN partikülleri de kompleks şekilli ve yaklaşık olarak 25 µm boyutlarındadır. Polyester tozları karışımda mevcut diğer tozlardan farklı olarak küresel şekillidir ve yaklaşık olarak 20 µm boyutlarındadır.

Tablo 7.1. Kaplama işleminde kullanılan (Bağ-Seramik) kaplama tozlarının SEM görüntüleri.

Bağ Tabaka**MSZ****MSZ+%3BN****MSZ+%3BN+%5PTFE****MSZ+%3BN+%10PTFE**

7.6. Kalınlık Ölçümü Sonuçları

Kalınlık ölçüm aletiyle 6 farklı noktadan alınan ölçümler sonucunda numunelerin ortalama kalınlık değerleri Tablo 7.2.'de sergilenmektedir. Kalınlık ölçüm cihazıyla yapılan ölçüm sonuçlarında bağ tabaka + seramik kaplama kalınlığı ölçülmüş olup değerlerden anlaşıldığı üzere plazma sprej ve alev sprej kaplamaların MSZ+BN%3+PTFE%10 karışım tozuyla yapılan kaplamada birikme problemiyle karşılaşmıştır.

Tablo 7.2. Alev sprej kaplama numunelerinin kalınlık ölçümlerinin ortalama değerleri.

Alev Sprej	Ortalama Kalınlık	Plazma Sprej	Ortalama Kalınlık
Numuneleri	(μm)	Numuneleri	(μm)
A.S-M	170 $\pm$ 30	P.S-M	200
A.S-MB	170 $\pm$ 10	P.S-MB	100 $\pm$ 50
A.S-MBP₅	170 $\pm$ 7	P.S-MBP₅	160 $\pm$ 5
A.S-MBP₁₀	100 $\pm$ 20	P.S-MBP₁₀	60 $\pm$ 20

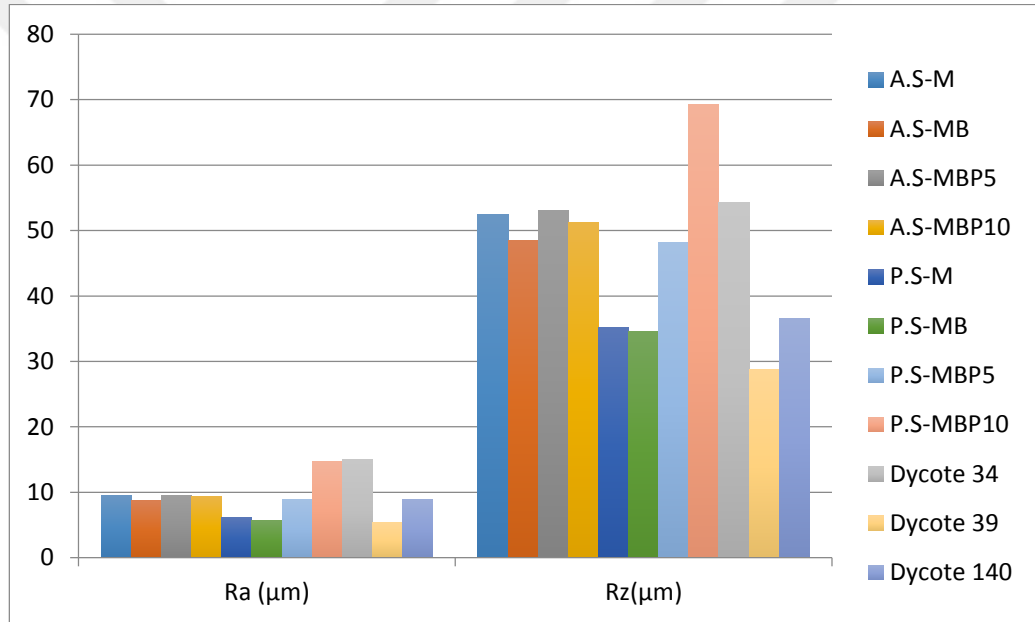
7.7. Yüzey Pürüzlülük Testi Sonuçları

Alev sprej ve plazma sprej kaplama numunelerinin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri Tablo 7.3.'de sergilenmektedir. Tablodan anlaşılabacağı üzere en pürüzlü yüzey özellikleri plazma sprej kaplama ile kaplanmış olan P.S-MBP₁₀ numunesinde görülmüştür. Alev sprej yöntemiyle kaplama uygulanan dört numune de ortalama olarak yakın yüzey pürüzlülüklere sahiptir ve genel anlamda plazma sprej prosesi ile kaplanmış olan numunelerden daha pürüzlü yüzeylere sahip olduğunu söylemek mümkündür. Plazma sprej kaplama yöntemi kullanılarak kaplanan numuneler daha pürüzsüz ve kaliteli yüzey özellikleri sergilemektedir. Pürüzlülük değerleri poteyaj kaplama uyguladığımız numuneler ile kıyaslandığında, alev sprej kaplama yöntemiyle kaplanan numunelerin yüzey kaliteleri Dycote 140 ile benzerken, plazma sprej kaplama ile kaplanmış P.S-MB ve P.S-M numuneleri Dycote 39 numunelerinin yüzey özelliklerini hemen hemen yakalamıştır. Dycote 34 kaplamaların pürüzlü yüzey

özellikleri (R_a : 14,97 μ m, R_z : 54,27 μ m) P.S-MBP₁₀ numunesi ile örtüşmektedir. Daha kapsamlı bir karşılaştırma imkanı sunan grafik Şekil 7.11.'de sergilenmektedir.

Tablo 7.3. Alev sprej ve plazma spreyle kaplama uygulanmış numunelerin yüzey pürüzlülükleri.

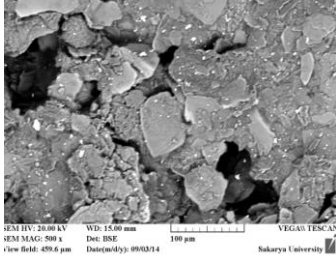
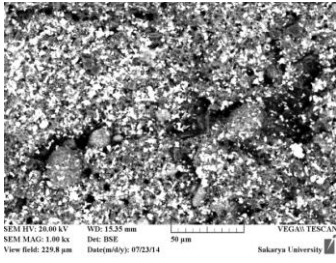
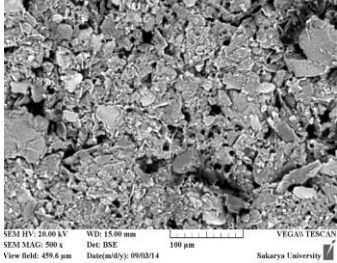
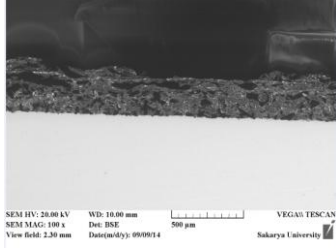
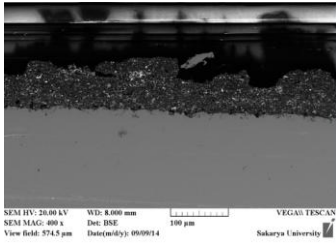
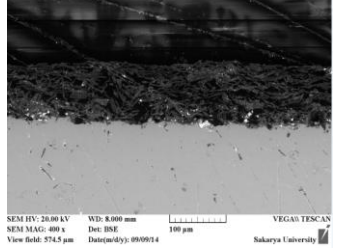
Numuneler	Alev Sprej Kaplama Uygulanmış				Plazma Sprej Kaplama Uygulanmış			
	A.S-M	A.S-MB	A.S-MBP ₅	A.S-MBP ₁₀	P.S-M	P.S-MB	P.S-MBP ₅	P.S-MBP ₁₀
R_a (μm)	9,5725	8,66	9,5785	9,4043	6,21	5,621	8,92	14,6966
R_z (μm)	52,475	48,56	53,13	51,26	35,21	34,55	48,25	69,2666



Şekil 7.11. Alev sprej ve plazma sprej kaplama uygulanmış numuneler ile poteyaj kaplama uygulanmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerini karşılaştıran grafik.

Ölçümler sonucunda ulaşılan değerlerin ortalamaları alınarak elde edilen verilere göre yüzey pürüzlülüğü en fazla olan numuneler daha iri tane boyutları nedeniyle Dycote 34 poteyaj kaplanmış numuneler olarak gözlenmiştir (Tablo 7.4.). Diğer numunelerle kıyaslandığında daha az yüzey pürüzlülük özelliği Dycote 39' ile kaplanmış numunelerde gözlenmiştir. Kaplanmış numunelerin R_a ve R_z değerlerinin kıyaslandığı grafik ise Şekil 7.11.'de sergilenmektedir.

Tablo 7.4. Poteyaj kaplamalarının yüzey ve kesit incelemesi

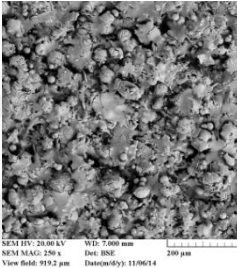
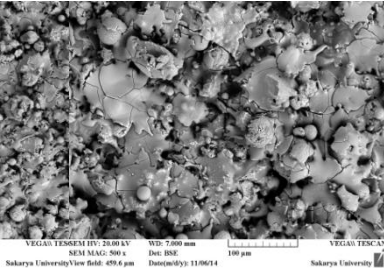
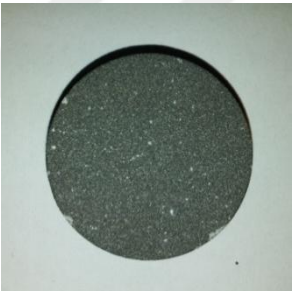
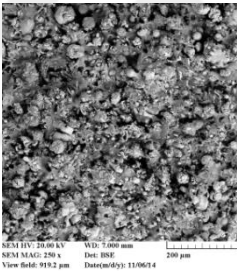
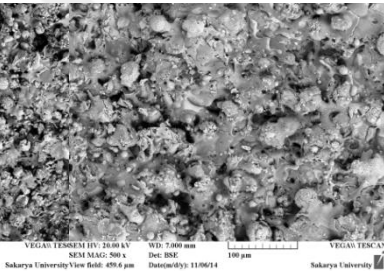
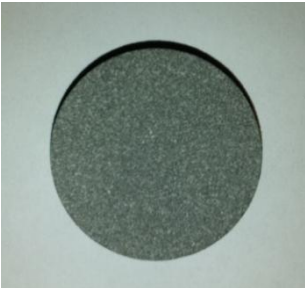
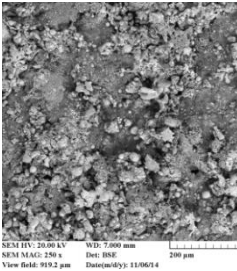
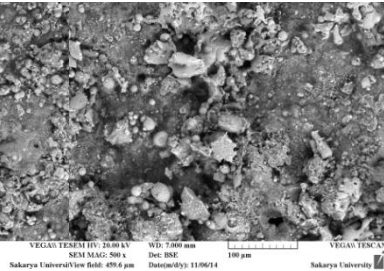
Dycote 34	Dycote 39	Dycote 140
Tane boyutu: 80µm	15µm	35µm
		
Kaba ve pürüzlü yüzey	İnce ve pürüzsüz yüzey	Ortalama incelik ve pürüzlülük
Ra :14,97 µm	Ra:5,34 µm	Ra:8,90 µm
		
		
Yüksek porozite ve Makro porozitelerin olduğu kaplama kesiti	Düşük porozite ve yoğun bir yapı	Poroziteli Ortalama yüzey kalitesinde kaplama kesiti
Kalınlık:263,57±25 µm	Kalınlık: 72,41±25 µm	Kalınlık: 126.74 ±35µm

7.8. Üst Yüzey Mikroskobik İncelemeler

Alev sprej kaplama işlemi uygulanarak hazırlanmış numunelerin üst yüzey SEM görüntüleri Tablo 7.5.'de sergilenmektedir. A.S-M numunesinin makro boyuttaki görüntüsü beyaz kaplama ve homojen renk dağılımı şeklindedir. SEM görüntülerinden anlaşılabileceği üzere pürüzlü bir yapı tam ergiyememiş parçacıklar ile sıçrayarak saçılmış splatlar mevcuttur. Bu splatlar ve ergimemiş parçacıklar yüzeyin pürüzlü görünümünün başlıca nedenlerini oluşturmaktadır. A.S-MB numunesinin fotoğrafında ise ergiyememiş Bor Nitrür partikülleri gözle görülebilir şekilde olmasının yanında,

SEM üst yüzey görüntülerinde de ergiyememiş Bor Nitrür partikülleri ve fazla ergiyerek sıçramış partiküller görülmektedir. A.S-MBP₅ numunesinin SEM görüntülerinde diğerlerinden farklı olarak daha pürüzsüz ve ince bir görüntü hakimdir. A.S-MBP₁₀ numunesinin kaplama görüntüsü de yine ince partiküllü ve pürüzlü bir şekildedir. Kaplamanın iyi birikme göstermediğini söylemek mümkündür.

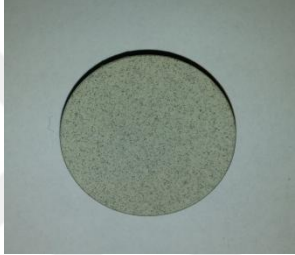
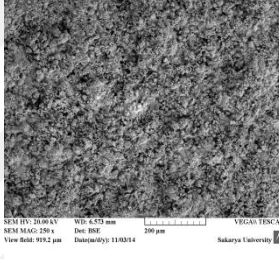
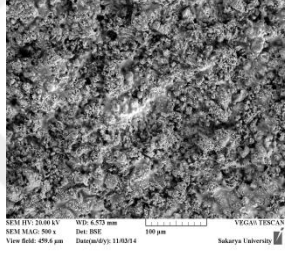
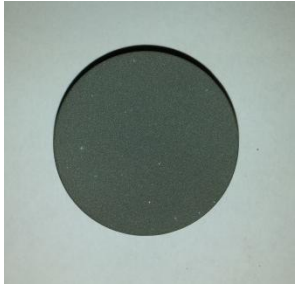
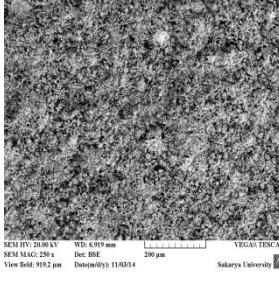
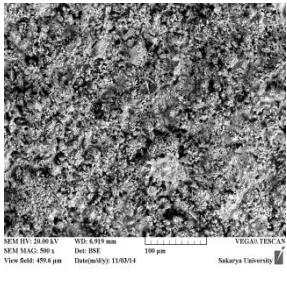
Tablo 7.5. Alev sprej kaplama işlemi ile hazırlanmış olan numunelerin üst yüzey SEM görüntüleri

Numun e	Makro Görüntü	SEM-250X	SEM-500X
A.S-M			
A.S-MB			
A.S-MBP ₁₀			

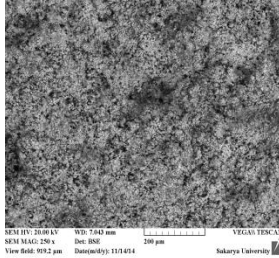
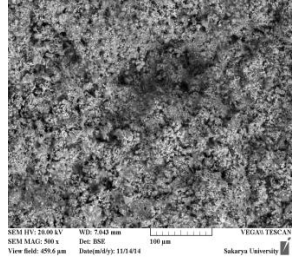
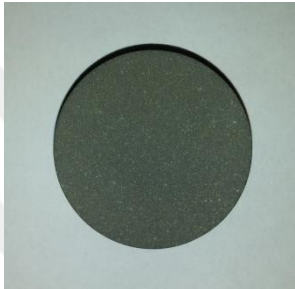
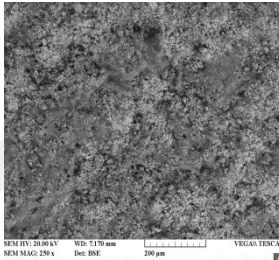
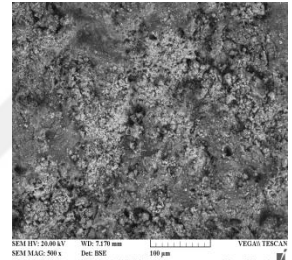
Plazma sprej kaplama işlemi uygulanarak hazırlanmış olan numunelerin makro boyutlu görüntüleri ile SEM üst yüzey görüntüleri Tablo 7.6.'de sergilenmektedir. Görüntülerden anlaşılabacağı üzere genel anlamda alev sprej kaplama metodu kullanılarak hazırlanmış olan numuneler ile kıyaslandığında numuneler daha yoğun ve pürüzsüz kaplama görüntüsüne sahiptir.

P.S-M numunesi makro boyutlu görüntülerinde beyaz renge sahip olup SEM görüntülerinde yoğun bir kaplama ve tam ergimiş partiküller nedeniyle daha pürüzsüz yüzey görüntüsüne sahiptir. P.S-MB numunesi de diğeriyle benzer şekilde hatta daha yoğun ve kaliteli yüzey görüntüsüne sahip olmakla birlikte kaplama tozlarında ki tam ergime dikkat çekmektedir. Makro boyutlu görüntüsünde ise ergimemiş Bor Nitrür partikülleri beyaz noktalar şeklinde görünmektedir. P.S-MBP₅ ve P.S-MBP₁₀ numuneleri ise diğer iki plazma sprej kaplama numunesine göre daha ince ve kaliteli yüzey görüntüsü sergilemiştir.

Tablo 7.6. Plazma Sprej kaplama işlemi uygulanarak hazırlanmış numunelerin üst yüzey SEM görüntüleri.

Numunler	Makro Görüntü	SEM-250X	SEM-500X
P.S-M		 SEM HV: 20.00 kV SEM MAG: 250 x View field: 915.2 µm WD: 6.572 mm Det: BSE Date/Time: 11/03/14 VEGA\\TSCAN Sakarya University	 SEM HV: 20.00 kV SEM MAG: 500 x View field: 459.6 µm WD: 6.572 mm Det: BSE Date/Time: 11/03/14 VEGA\\TSCAN Sakarya University
P.S-MB		 SEM HV: 20.00 kV SEM MAG: 250 x View field: 915.2 µm WD: 6.569 mm Det: BSE Date/Time: 11/03/14 VEGA\\TSCAN Sakarya University	 SEM HV: 20.00 kV SEM MAG: 500 x View field: 459.6 µm WD: 6.519 mm Det: BSE Date/Time: 11/03/14 VEGA\\TSCAN Sakarya University

Tablo 7.6. Plazma Sprey kaplama işlemi uygulanarak hazırlanmış numunelerin üst yüzey SEM görüntüleri(Devamı).

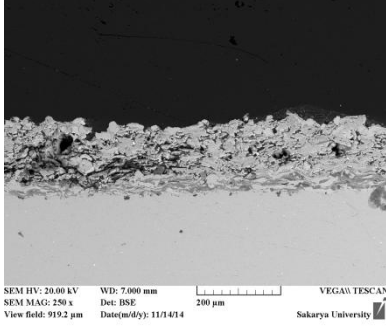
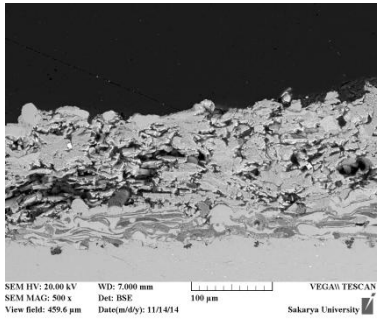
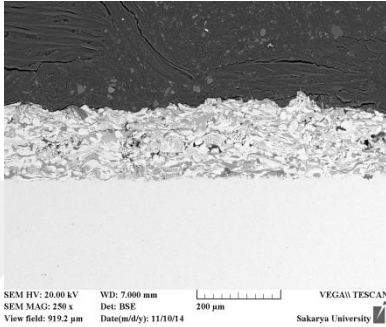
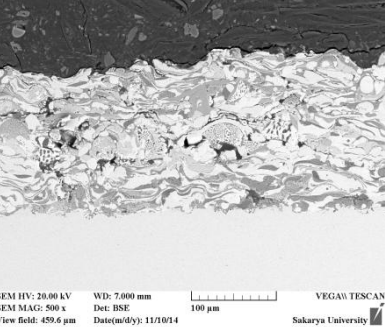
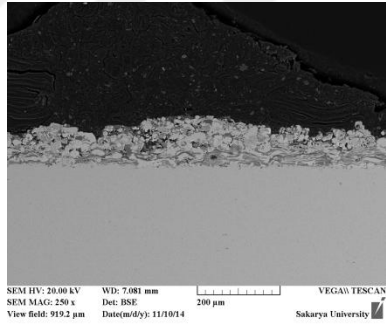
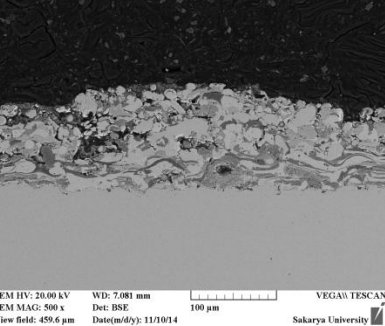
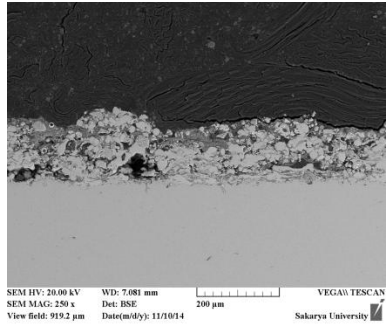
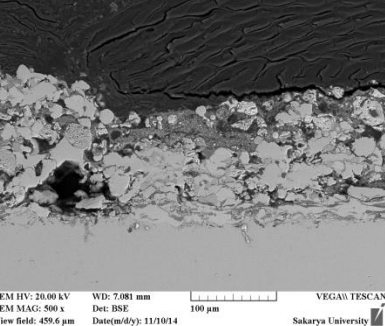
Numunler	Makro Görüntü	SEM-250X	SEM-500X
P.S-MBP ₅			
P.S-MBP ₁₀			

7.9. Kaplama Kesitlerinin Mikroskobik İncelemeleri

Alev sprej kaplama numunelerinin kesitlerinden alınan SEM görüntüleri Tablo 7.7.'da sergilenmektedir. Numunelerin kesit görüntülerinden çıkarılabilecek genel sonuç alev sprej kaplamalarda yüksek poroziteli yapıdır. A.S-M numunesi yüksek poroziteli bir yapı sergilemiştir ayrıca görüntülerden MSZ tozlarının ergiyememiş ve üst üste plakalar şeklinde tutunduğu görülmektedir.

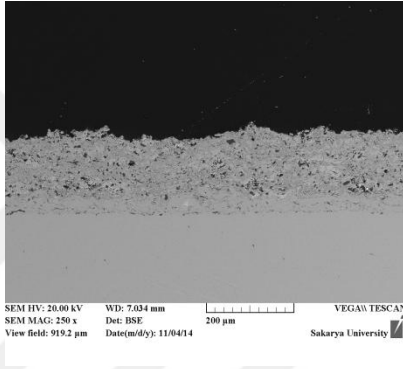
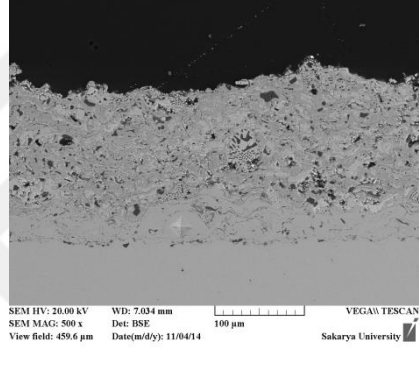
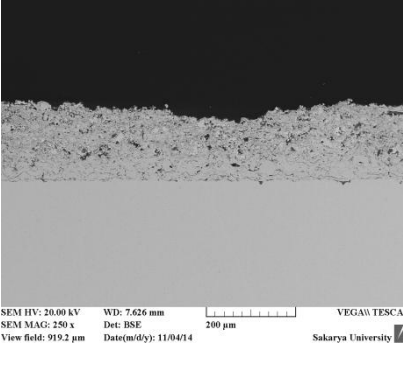
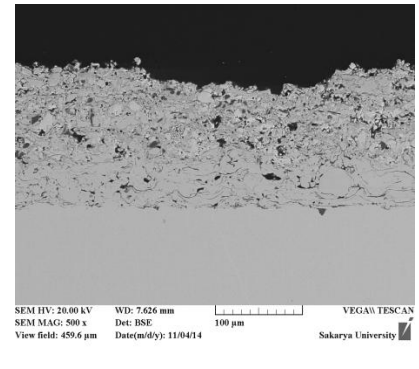
A.S-MB numunelerinin kesit görüntüsü ise daha kompakt ve lamelli bir morfoloji sergilemiştir. A.S-M ile karşılaştırıldığında Bor Nitrür içeren kaplamanın daha mikro seviyelerde porozite içerdiğini söylemek mümkündür. A.S-MBP₅ ve A.S-MBP₁₀ numunelerinin homojen olmayan porozite dağılımı ve porozite boyutuna sahip olduğu ve kaplama kalınlığının da değişken olduğu görülmektedir. Ergimiş ve ergimemiş partiküller bir arada yoğun bir kaplama morfolojisi sergilemektedir.

Tablo 7.7. Alev sprej kaplama numunelerinin kesitleri üzerinden alınan SEM görüntüleri.

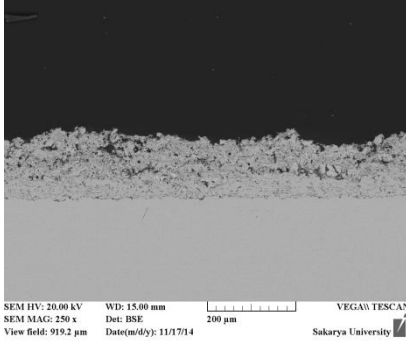
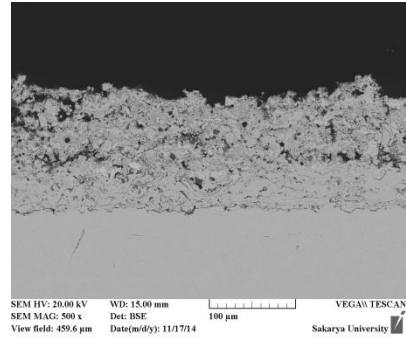
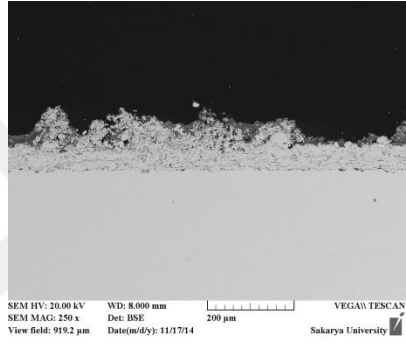
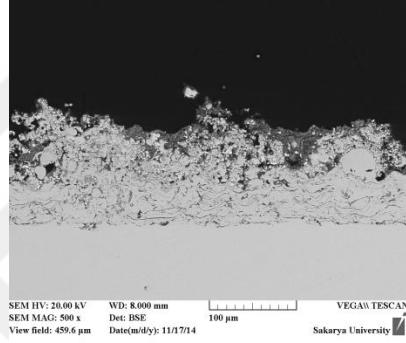
Numuneler	SEM-250X	SEM-500X
A.S-M		
A.S-MB		
A.S-MBP ₅		
A.S-MBP ₁₀		

Plazma sprej kaplama yöntemi kullanılarak kaplanmış olan numunelerin kesitleri üzerinden alınan SEM görüntüleri Tablo 7.8.'de sergilenmektedir. SEM görüntülerine göre, plazma sprej numuneleri alev sprej kaplama numunelerine göre daha yoğun ve az poroziteli yapıya sahiptir. P.S-M ve P.S-MB numuneleri homojen dağılımlı ve yoğun bir yapı sergilerken, P.S-MP₅ numunesi diğer iki plazma numunesinden daha yüksek poroziteli bir yapıya sahiptir. P.S-MBP₁₀ numunesinin birikme verimliliği düşük ve kalitesiz bir kaplama özelliği sergilediği görülmektedir.

Tablo 7.8. Plazma sprej kaplama numunelerinin kesitleri üzerinden alınan SEM görüntüleri.

Numunler	SEM-250X	SEM-500X
P.S-M		
P.S-MB		

Tablo 7.8. Plazma sprej kaplama numunelerinin kesitleri üzerinden alınan SEM görüntüleri (Devamı).

Numunler	SEM-250X	SEM-500X
P.S-MBP ₅		
P.S-MBP ₁₀		

7.10. Alev Sprey Ve Plazma Sprey Kaplamaların Mikrosertlik Ölçümleri

Alev sprej ve plazma sprej kaplama prosesi ile hazırlanmış olan numunelerin ortalama mikro-sertlik değerleri Tablo 7.9.'de sergilenmektedir. Sertlik ölçümleri Vickers mikro-sertlik ölçüm tekniğiyle $HV_{0,1}$ yük altında ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre bağ tabakaların sertliği $380 \pm 25 HV_{0,1}$ olarak ölçülmüş olup plazma sprej kaplama numunelerinin yüksek sertlik değerlerinin alev sprej kaplamaya kıyasla daha yoğun kaplama yapısına sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 7.9. Alev sprej ve plazma sprej kaplama prosesleriyle hazırlanmış olan numunelerin ortalama mikrosertlikleri.

	A.S-M	A.S-MB	A.S-MBP ₅	A.S-MBP ₁₀	P.S-M	P.S-MB	P.S-MBP ₅	P.S-MBP ₁₀
Bağ tabaka	385	377	349	380	385,66	385,33	406	392
Seramik tabaka	409,8	386,2	429,8	309	833,75	419,5	300,75	-

7.11. Poteyaj ve Termal Sprej Kaplamalarının İslatma Açısı Ölçümleri

Deneysel çalışmalar Krüss marka ıslatma açısı ölçüm cihazında gerçekleştirilmiş olup 4 µl hacminde distile su damlası kullanılmıştır. Testler sırasında ortam sıcaklığı 25 °C olarak kaydedilmiştir. Testler her numune için video kayıt şeklinde alınmış, damlacığın yüzeye düşüşünden itibaren 10 ms, 20 ms ve 30 ms sürelerindeki ilk üç damlacığın ıslatma açıları ölçülmüştür. Ölçüm metodu olarak Circle metodu kullanılmıştır. Sonuçlar kaydedildikten sonra (Tablo 7.10.) poteyaj kaplamalar ve termal sprej kaplama numunelerinin arasında kıyaslamalar yapılmıştır.

Tablo 7.10. Poteyaj ve termal sprej kaplama uygulanmış numune yüzeylerinin ıslatma açısı ölçüm sonuçları.

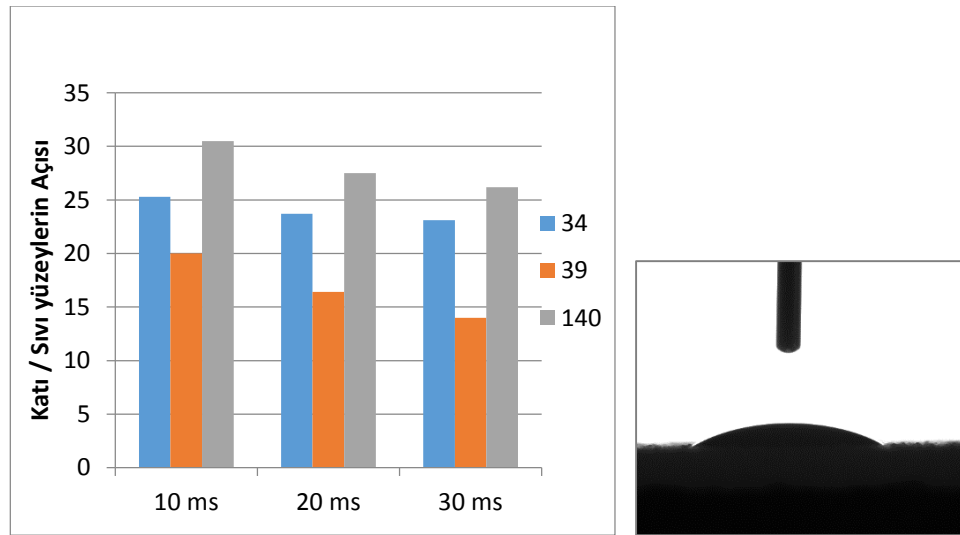
Tür	Poteyaj kaplamalar			Alev Sprej kaplamalar				Plazma kaplamalar			
Kod	D 34	D 39	D 140	M	MB	MBP ₅	MBP ₁₀	M	MB	MBP ₅	MBP ₁₀
10 ms	25,3	20,0	30,5	90,2	96,9	111,5	114,1	100,6	133,2	110,5	134,3
20 ms	23,7	16,4	27,5	87,7	96,0	110,5	113,6	100,3	133,2	109,8	134,3
30 ms	23,1	14,0	26,2	87,6	95,5	110,5	112,9	100,0	133,1	109,0	133,8

M: MSZ, MB: MSZ+ Bor nitrid , MBP: MSZ+ Bor nitrid +PTFE

AS: Alev Sprej, PS: Plazma Sprej

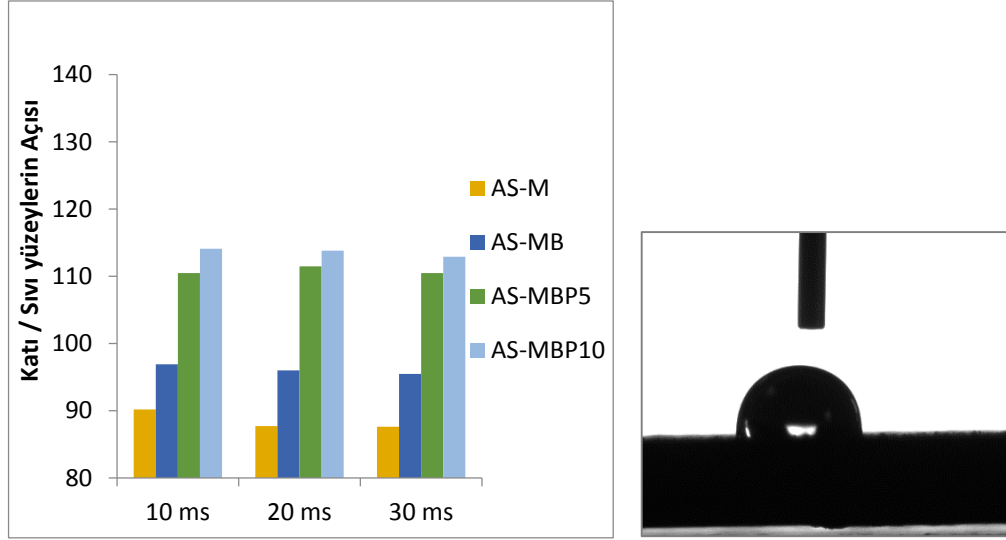
Tablo 7.10.'den görüleceği üzere poteyaj kaplama numunelerinin açık poroziteli yapısı nedeniyle ıslatma açıları oldukça düşük olmakla birlikte 10 ms sonunda en yüksek ıslatma açısı değeri Dycote 140 numunesinde 30,5 ° olarak ölçülmüştür. 25,3 ° açıyla Dycote 34 takip ederken, en düşük ıslatma açısı değeri Dycote 39'da elde edilmiştir.

Alev sprej kaplama numuneleri poteyaj kaplamalara göre çok daha yüksek ıslatma açısı değerlerine sahip olmakla birlikte en yüksek ıslatma açısı AS-MBP₁₀ numunesinde 114,1 ° olarak kaydedilmiştir. En düşük ıslatma açısı değerini ise AS-M numunesi vermektedir. Plazma sprej kaplama uygulanmış olan numunelerde ise poteyaj ve alev sprej kaplama uygulanmış olan numunelere kıyasla daha yüksek ıslatma açısı değerleri kaydedilmiş olup en yüksek açısı değeri PS-MBP₁₀ numunesinde 134,3 ° olarak görülmektedir. Bu ıslatma özelliklerinin değişim şeklinin porozite yoğunluğu ve açık poroziteli yapıya sahip olma durumuyla orantılı değiştiği gözlenmiştir. Islatma açısının zamanla değişimini veren grafik Şekil 7.12.'de sergilenmektedir. Grafikten de anlaşıldığı üzere poteyaj kaplamalarda açık poroziteler nedeniyle sıvının yüzey tarafından emilmesi oldukça kısa sürelerde gerçekleşmekte olup 2 saniye gibi bir sürede yüzey tamamen ıslandığı dolayısıyla yüzeyin hidrofilik karaktere sahip olduğu görülmüştür. Alev sprej ve plazma sprej kaplama uygulanmış olan diğer numunelerde ıslanma süresi daha uzun olup genellikle bir süreden sonra sabitlenmiştir. 2 saniyelik video kayıtlardan sonra bile yüzeyde damlacığın durduğu yani yüzeyin hidrofobik olduğu gözlemlenmiştir.

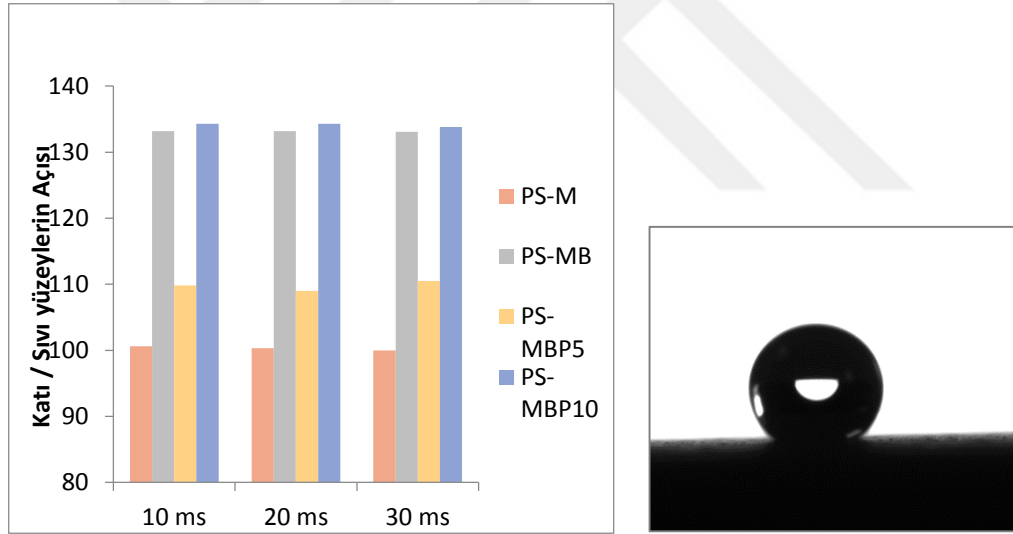


a) D-34,39,140 poteyaj kaplamaların ıslatma açıları, ölçüm esnasında D-140 numune üzerinde damlacığın formu.

Şekil 7.12. Poteyaj(a) ve termal sprej(b,c) kaplama numunelerinin zamana göre ıslatma açılarındaki değişim grafikleri.



a) Alev spreay kaplamaların(MSZ, MSZ+%3BN, MSZ+%3BN+%5PTFE, MSZ+%3BN+%10PTFE)ıslatma açıları. ölçüm esnasında MSZ+%3BN numune üzerinde damlacığın formu.



b) Plazma spreay kaplamaların(MSZ, MSZ+%3BN, MSZ+%3BN+%5PTFE, MSZ+%3BN+%10PTFE)ıslatma açıları,ölçüm esnasında MSZ+%3BN numune üzerinde damlacığın formu.

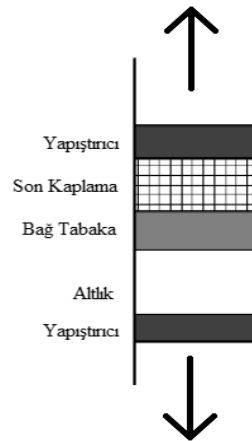
Şekil 7.12. Poteyaj(a) ve termal spreay(b,c) kaplama numunelerinin zamana göre ıslatma açılarındaki değişim grafikleri(Devamı).

Basıncılı döküm uygulamalarında kalıp yüzeyi ile ergiyik metal arasındaki ara yüzey ilişkisi oldukça önemlidir. Ergiyik metalin katı yüzeyini iyi ıslatması durumunda ürün ile kalıp arasındaki yapışma sonucunda hem kalıp ömrünün azalması hem de elde

edilecek olan üründen fire vermek söz konusu olmaktadır. Kalıp yüzeylerine termal sprey kaplama uygulayarak katı-sıvı arasındaki temas açısını artırarak yüzey gerilimini azaltmak mümkün olmaktadır. Bu sayede kalıpta yüzeylerinde yapışma engellenmekte kalıp ömrü uzatılmakta ve ürün kalitesi artmaktadır.

7.12. Yapışma Testleri

Yapılan deneysel çalışmada Scotch Weld marka epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır. Epoksi yapıştırıcı kaplama yüzeyine sürülmeden önce arka yüzeyleri yapıştırıcının iyi tutunabilmesi amacı ile kumlama yardımıyla pürüzlendirilmiştir ($Ra:2.5\mu m$). Bunun yanında kaplanan numuneyi tutacak aparatlarında yüzeyleri kumlanmıştır. Kumlama sonrasında yapıştırıcı Şekil 7.13.'de gösterildiği gibi yapıştırılarak, etüv de 2 saat $150^\circ C$ de kürlenme işlemine tabi tutulmuştur.

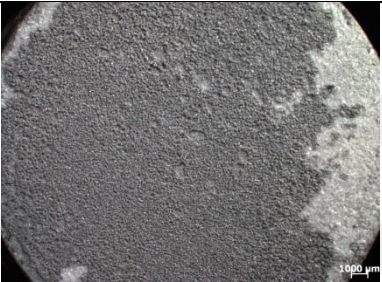
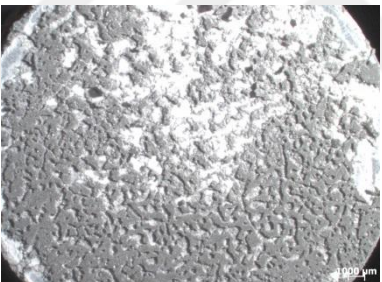
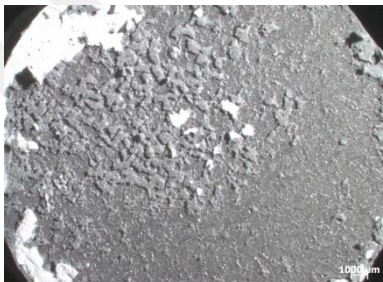


Şekil 7.13. ASTM C633 testinde kullanılan numunelerin yapıştırma şekli.

Kürlenme işleminden sonra Zwick marka Roel Z50 (5ton) model çekme cihazı kullanılarak yapıştırılan numuneler aparatlar yardımı ile çekme cihazına bağlanarak, ASTM C633 testi uygulanmıştır. Bu test içeriğinde bulunan 1 MPa ön yükleme 5 mm/dk hızla uygulanarak 0,013 mm/sn test hızında çekme işlemi yapılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Çekme testi sonuçlarına göre Tablo 7.11. poteyaj kaplamaların yapışma sonuçlarını gösterirken, Tablo 7.12.'de Alev sprey kaplamaların test sonuçları ve Tablo 7.13.'de plazma sprey kaplamaların sonuçları verilmektedir. Tablo da verilen resimlerdeki yüzey 1 kaplama tabakasının yüzeyini gösterirken yüzey

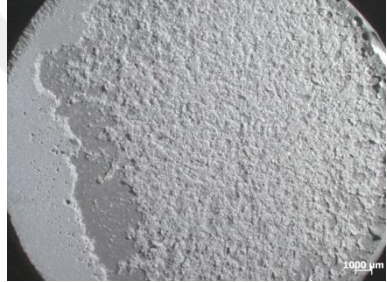
iki ise yapıştığı diğer yüzeyi göstermektedir. Kaplamaların sonuçları incelendiğinde alev sprej ile püskürtülen tozların yapışma test sonuçları plazma püskürtmeye göre daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca kaplamaların adhesif test görüntüleri incelendiğinde ise bazı kaplamaların kaplama yüzeyi yerine kumlanan yüzeyden koptuğu görülmüştür.

Tablo 7.11. Poteyaj kaplama uygulanmış numunelerin ASTM C633 test sonuçları.

	Yüzey 1	Yüzey 2
ASTM C633 Test Parametreleri / Poteyaj Kaplamalar		
Hız: 0,013 mm/s, Ön yükleme: 1MPa, Numune Çapı: 25,4mm		
Hava Basıncı: 5 bar, Püskürtme mesafesi: 20 cm		
D-34 6 MPa		
D-39 9 MPa		
D-140 4 MPa		

Poteyaj kaplama uygulanmış olan test numunelerine ait sonuçlar yukarıda sergilenmektedir. Testlerde tüm numunelerin kaplama yüzeyinden ayrılımlar olduğu görülmüştür. Dycote 34 numaralı test numunesinin dayanımı 6 MPa olarak ölçülmüştür. Dycote 39 test numunesi en yüksek yapışma mukavemeti gösteren numune olup 9 MPa olarak ölçülmüştür. Dycote 140 ise en düşük yapışma mukavemetine sahip kaplama olarak 4 MPa dayanım göstermiştir.

Tablo 7.12. Alev sprej kaplama uygulanmış numunelerin ASTM C633 test sonuçları

	Yüzey 1	Yüzey 2
ASTM C633 Test Parametreleri / Alev Sprej parametreleri		
Hız: 0,013 mm/s, Ön Yükleme: 1 MPa, Numune Çapı: 25,4 mm,		
Oksijen 30 NLPM, Asetilen 12,5 NLPM ve hava 150 NLPM, 12 cm mesafeden		
1. Deney		
Alev Sprej		
Kullanılan Toz		
MSZ		
42 MPa		
2.Deney		
Alev Sprej		
MSZ+BN%3		
Kullanılan toz		
56 MPa		
3.Deney		
Alev Sprej		
Kullanılan toz		
MSZ+BN%3+PTFE%5		
61 MPa		
4.Deney		
Alev Sprej		
Kullanılan toz		
MSZ+BN%3+PTFE%10		
25-29 MPa		

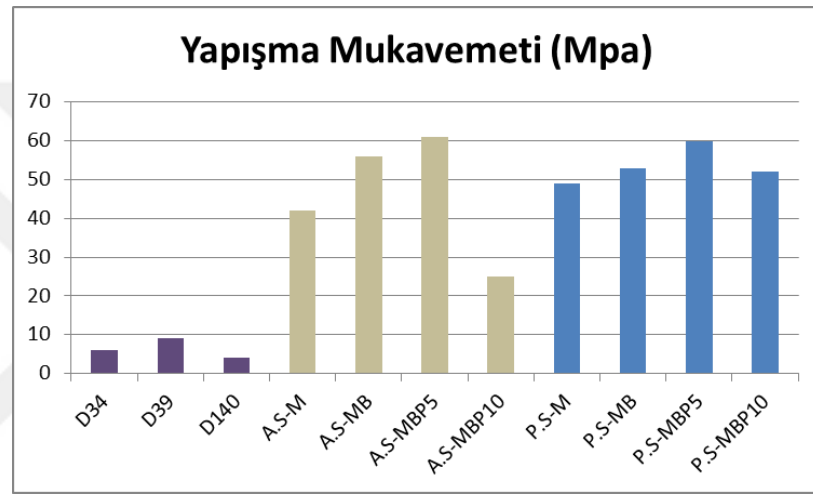
Tablo 7.13. Plazma sprej kaplama uygulanmış numunelerin ASTM C633 test sonuçları

	Yüzey 1	Yüzey 2
ASTM C633 Test Parametreleri / Plazma Sprey Parametreleri Hız: 0,013 mm/s, Ön Yükleme: 1 MPa, Numune Çapı: 25,4 mm, Argon 45 NLPM, Hidrojen 10 NLPM, hava 2 bar, gerilim 70 V, 600 A akım ve 12 cm püskürtme mesafesi		
3. Deney Plazma Sprey Kullanılan Toz MSZ 49 MPa		
4. Deney Plazma Sprey Kullanılan Toz MSZ+BN%3 53 MPa		
5. Deney Plazma Sprey Kullanılan Toz MSZ+BN%3+PTFE%5 60 MPa		
6. Deney Plazma Sprey Kullanılan Toz MSZ+BN%3+PTFE%10 52 MPa		

A.S-MBP10 numunesinde politetrafloretillen olarak kullanılan bağlayıcının değerinin artması alev sprej ile yapılan kaplamayı olumsuz etkilemiştir. Kaplamaya uygulanan adhezyon testinde değer 25 MPa çıkmıştır. Test sonrası görüntüler incelendiğinde ise yapıştırıcı kaplamayı iyi tutmuş ve kaplamadan kopmasına neden olmuştur.

Yukarıdaki tartışma sonucu incelendiğinde alev sprej kaplamada bağlayıcı arttıkça dayanım önce artmakta daha sonrasında ise düşmektedir. Plasma sprej de ise bağlayıcı arttıkça kaplama dayanımlarını yukarıya çekmektedir.

Alev sprej ve plazma sprej kaplamalar ile kıyaslandığında, poteyaj kaplamanın çok düşük bir adhesif mukavemete sahip olduğu görülmektedir. Poteyaj ve termal sprej kaplamaların uygulanmasıyla elde edilen numunelere uygulanan ASTM C633 testinin sonuçlarını kıyaslayan grafik Şekil 7.14.'de sergilenmektedir.



Şekil 7.14. ASTM C633 testi uygulanan numunelerin yapışma mukavemeti.

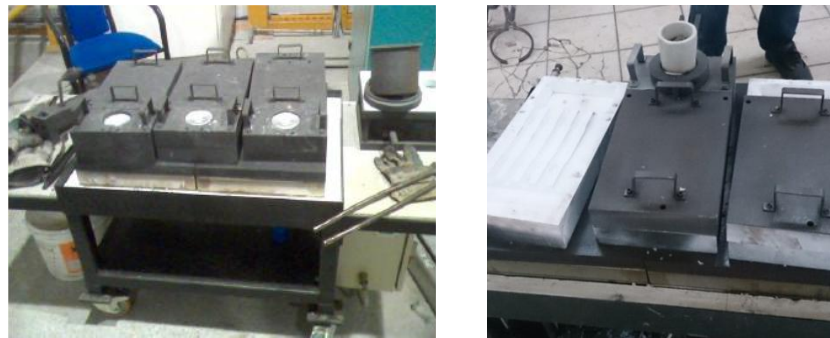
7.13. Sıvı Metal Akışkanlık Testi Sonuçları

Sakarya Üniversitesi Teslab laboratuvarında alev sprej ve plazma sprej kaplama uygulanmış olan akışkanlık testi kalıbının kaplama sonrası görüntüleri Şekil 7.15.'de sergilenmektedir. Kaplama hazırlıkları sürecinde öncelikle kalıp alkol ile silinmiş ve kumlama işlemine tabi tutulmuştur. Kaplama öncesi hazırlıkları tamamlanmış kalıp $150 \pm 20^\circ\text{C}$ 'ye ısıtılmıştır. Kaplamada MSZ tozu kullanılmış olup, diğer deney numuneleri ile aynı parametreler kullanılarak uygulanmıştır (Alev sprej kaplama için; O_2 : 15 NLPM, Asetilen: 12,5 NLPM ve hava 150 NLPM, Plazma sprej kaplama için; Argon 45 NLPM, Hidrojen 10 NLPM ve hava 2 bar).



Şeki 7.15. Sıvı metal akışkanlık test kalıbının alev sprey kaplama prosesi ile kaplanması.

Kalıp kaplama işlemlerinden sonra CMS Jant ve Makine San. A.Ş tarafından akışkanlık testleri uygulanmıştır. Deneyler 150, 200 ve 300 °C’de iki tekrarlı testler şeklinde yapılmıştır. Toplam ilerleme miktarları ölçülmüş ve 300 °C’de elde edilen döküm numunesi üzerinden yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Sıvı metal akışkanlık testleri uygulaması Şekil 7.16.’da sergilenmektedir.



Şekil 7.16. Sıvı metal akışkanlık testi uygulaması.

Test sonrası elde edilen sonuçlar Tablo 7.14.'de sergilenmektedir. Bu sonuçlara göre alev sprej kaplama uygulanmış olan numunelerde 200 ve 300 °C'ler arasında beklenenin aksine bir eğilim gözlenmiş olup test değişkenlerine bağlı bir durum olabileceği düşünülmektedir. Plazma sprej kaplama uygulanmış kalıptan elde edilmiş olan sonuçlarda test sıcaklığı ile beklenen ilerleme arasındaki tutarsızlığın olduğu dikkat çekmektedir. Deneysel hataların ve test parametre çalışmasının bu tutarsızlığı çözmekte yararlı olacağı izlenimi doğmuştur. Plazma sprej kaplama yöntemi kullanılarak kaplanmış olan kalıpların test sonuçları alev sprej kaplama sonuçlarından çok daha düşük olduğu görülmektedir. Bir önceki dönem çalışmasında poteyajın etkileri vurgulanırken de bahsedildiği üzere ergiyik metalin ilerlerken tercih ettiği yol her zaman daha pürüzlü olan yoldur. Buradan hareketle plazma sprej kaplamanın düşük poroziteli ve yoğun yapısı nedeniyle sahip olduğu kaliteli yüzeyin ilerleyememe davranışı üzerindeki etkisinin büyük olduğu düşünülmektedir.

Tablo 7.14. Sıvı metal akışkanlık testi sonuçları.

	Sıcaklık	150 °C	200 °C	300 °C
Alev sprej kaplama	İlerleme 1. Kol	300	300	300
	İlerleme 2. Kol	300	300	300
	İlerleme 3. Kol	155	300	300
	İlerleme 4. Kol	117	300	300
	İlerleme 5. Kol	0	115	10
	Toplam ilerleme (mm)	872	1315	1210
Plazma sprej kaplama	İlerleme 1. Kol	140	250	300
	İlerleme 2. Kol	100	160	300
	İlerleme 3. Kol	80	70	300
	İlerleme 4. Kol	30	20	300
	İlerleme 5. Kol	0	0	300
	Toplama İlerleme (mm)	550	500	1500

Tablo 7.14. Sıvı metal akışkanlık testi sonuçları(Devamı).

	Kol No	Genişlik (mm)	Uzunluk (mm)	Kalınlık (mm)
	1	15	300	9
	2	15	300	7
	3	15	300	5
	4	15	300	3,5
	5	15	300	2,5

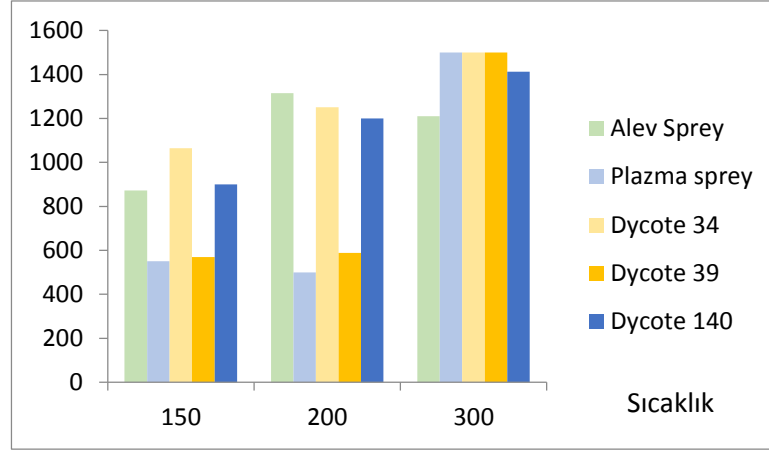
Alev sprey kaplama



Plazma sprey kaplama



Alev sprey ve plazma sprey kaplama uygulanmış olan test kalıbının deneysel sonuçları ile poteyaj kaplamaların sıvı metal akışkanlık testi sonuçlarını karşılaştıran grafik Şekil 7.17.'de sergilenmektedir. Daha önceden poteyaj ile alınan sonuçlar ile alev sprey sonuçları karşılaştırıldığında, halen üretimde kullanılan kaplama malzemelerine benzer performans sergilediği, hatta D39'dan daha iyi sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Plazma sprey kaplamanın poteyaj kaplama uygulamasına kıyasla daha düşük performans sergilediği görülmektedir.



Şekil 7.17. Alev sprej ve plazma sprej kaplama uygulaması ile poteyaj uygulamasının sıvı metal akışkanlık testi sonuçlarını karşılaştıran grafik.

Poteyaj ile kaplanmış olan kalıptan çıkarılan parça ile alev spreyle kaplanmış olan kalıptan çıkarılan döküm parçalarının yüzey pürüzlülük değerleri Tablo 7.15.'de sergilenmektedir. 300°C sıcaklıkta yapılan döküm yüzeylerden yüzey pürüzlüğü testi Mitutoyo SJ301 ekipmanı kullanılarak JIS1994 Gauss, $\lambda_c = 0,8\text{mm} \times 5 = 4\text{mm}$ olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Alev sprej ve plazma sprej kaplanmış olan kalıplardan çıkarılmış döküm parçasının yüzey kalitesi tatminkar seviyededir. Alev sprej kaplanmış kalıptan çıkarılmış olan dökümün yüzey pürüzlülükleri D34 poteyajından düşük ancak D140 ve D39 poteyajlarının az üzerindedir. Plazma sprej kaplanmış kalıptan çıkan parçanın yüzey pürüzlülüğü ise alev sprej kaplanmış olandan daha düşük poteyaj uygulamalarından D140 ile benzer kalitededir.

Tablo 7.15. Poteyaj, alev sprej ve plazma sprej kaplama uygulanmış kalıplardan çıkarılan döküm parçalarının yüzey pürüzlülük değerleri.

	D-34	D-39	D-140	A.S-M	P.S-M
R_a (µm)	4,62	2,46	2,84	3,28	2,84
R_z (µm)	22,08	13,10	16,61	16,8	14,8



7.14. Yapılması Önerilen Çalışmalar

1. Zirkonya esaslı kaplamalar haricinde müllite ve spinel esaslı kaplama türleride basınçlı döküm kaplamaları için önerilmektedir. Kaplama kalınlıklarının kalıp yüzeylerinde homojen bir şekilde gerçekleştirilmesi için robotik kontrollü kaplama sistemleri ile çalışılması hedeflenen kaplama kalınlığının elde edilmesine olanak sağlayacaktır.
2. Kaplamaların yapışma dayanımının artırılması amacı ile yüzey kumlama operasyonları ve yüzey temizleme işlemleri hassas bir şekilde gerçekleştirilmeli kalıp ön temizliği kaplamanın yapışma mukavemetini önemli şekilde etkilemektedir.
3. Plazma sprej yöntemi yerine fleksikord yöntemi ile kaplama uygulamaları daha uygun maliyetlerde gerçekleştirilebilir. Fleksikord kaplama prosesi ile plazma sprej kaplama kalitesine yakın kaplamalar elde edilebilir.
4. Kalıbın ısınma ve soğuma simülasyon aşamasında karmaşık şekilde kalıbın farklı yüzeylerine farklı kalınlıklarda ve farklı kompozisyonlarda kaplamaların uygulanması önerilmektedir. Zira merkez bölge spoke, rim bölgelerinin farklı ısı transferleri olmaktadır.

BÖLÜM 8. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

- Düşük basınçlı alüminyum jant dökümü kalıplarında kullanılan poteyaj kaplamalar (kalıp yüzeyi için uygun ticari kaplamalar) laboratuvar şartlarında sistematik bir şekilde üretilebilmiştir. Ticari kodlarına (Dycote 34, Dycote 39, Dycote 140) bağlı olarak ve tedarikçi firmanın yönlendirmesi sonucunda belirlenen püskürtme parametreleri ile çelik altlık üzerinde hedeflenen (100µm) kaplama kalınlıkları elde edilebilmiştir.
- Deneysel çalışmalar sonunda poteyaj kaplama uygulanan numunelerin kesit ve üst yüzey mikroyapı incelemelerinde Dycote 34'ün fazla oranda makro poroziteli mikroyapıya sahip olduğu görülmüştür. Dycote 39 ile kaplanan numuneler de ise daha yoğun ve pürüzsüz bir görüntü gözlemlenmiştir. Dycote 140 kaplamalarda ise yine poroziteli yapı gözlemlenmesine karşın gözeneklilik oranı ve porozitelerin büyüklüğü açısından kıyaslanacak olduğunda Dycote 34'e göre daha az gözenekli olduğunu söylemek mümkündür. Karşılaştırmalı porozite oranı sıralaması: Dycote 34 > Dycote 140 > Dycote 39.
- Poteyaj kaplamaların yüzey pürüzlülük test sonuçları açısından değerlendirildiğinde ise Dycote-34 > Dycote-140 > Dycote-39 şeklinde sıralama yapılabilir.
- Numunelerin XRD faz analizlerinde Dycote 34 ve Dycote 140'ın kimyasal kompozisyonlarında benzerlikler gözlemlenmesiyle birlikte, kimyasal bileşimleri içinde Magnesioarfedsonite, Talk ve Clinocllore fazlarına rastlanılmıştır. Dycote 39'da ise Anatase, Barite ve Quartz ile birlikte eser miktarda Iron Silicate Hydroxide ($\text{Fe}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) bulunduğu tespit edilmiştir.
- Poteyaj kaplamanın performansını tespit etmek amacıyla döküm öncesi uygulanan sıvı metal akışkanın kalıp boşluğunu doldurma kabiliyetini ve ince/kalın kesitlerde metal ilerlemesi açısından bir karşılaştırma yapmak için

uygulana test kalıbı sonuçlarına göre: en iyi akıcılık ve kalıbı doldurma kabiliyeti Dycote-34 esaslı kaplamalardadır. Buna karşın Dycote-39 esaslı kaplamaların kalın kesitler için uygun kalıbı doldurma kabiliyeti sergilemesine karşın ince kesitlerde yetersiz kaldığı gözlenmiştir. Dycote 140 esaslı kaplamalar ise Dycote 34'e göre daha düşük, dycote 39 'a göre ise daha yüksek kalıp doldurma kabiliyeti sergilemiştir.

- Özellikle ince kesitli kalıplarda dolma problemini aşmak için, Dycote-34 kaplaması test edilen ürünler arasında en iyi performansı göstermesine karşılık yüzey kalitesi diğerlerine göre oldukça düşüktür.
- Dycote-140 kaplaması akışkanlık testlerinde ideal sonuçlar vermekle birlikte bu kaplama kullanılarak dökümü gerçekleştirilmiş numune yüzeyleri pürüzlülük değerleri açısından oldukça tatminkardır.
- Poteyaj çözeltisi kurutulduktan sonra toz formunda x ışını difraksiyonları alınmış ve yapılan incelemelerde poteyaj kaplamalar ile kaplamanın toz formunun benzer kristal yapıya sahip olduğu gözlenmiştir. Belirgin bir fark gözlenmemiştir.
- Sıvı metal akışkanlık testi sonuçlarına göre alev sprej kaplama uygulanmış olan kalıptan elde edilmiş ilerleme sonuçları halen kullanılan poteyaj uygulamalara yakın çıkarak sonuçlar tatminkar seviyelerdedir. Ayrıca döküm parçasının yüzey pürüzlülüğü 3,28 μm değerinde olup Dycote 34 ile Dycote 140 arasında bir değere sahiptir. Plazma sprej kaplama uygulanmış olan kalıptan tutarsız sonuçlar elde edilmiş olup 150 ve 200 $^{\circ}\text{C}$ 'de sıvı metal akışı istenilen seviyelere ulaşamamıştır. Buna rağmen döküm parçasının yüzey pürüzlülük değerleri Dycote 140 ile aynı çıkarak kaliteli bir yüzey özelliği sergilemiştir.
- Poteyaj kaplamaların yüzey ıslatma kabiliyeti sıvı metal yapışma özelliklerini etkilemektedir. Alternatif olarak geliştirilen ve uygulanan termal sprej kaplamaların yüzey ıslatma kabiliyeti daha düşüktür. Bu durum sıvı metal yapışmasını engellemektedir.
- Poteyaj kaplamaların sıvı metal ile etkileşimi esnasında adhezif aşınma direncinin termal sprej kaplamalara oranla düşük olduğu tespit edilmiştir.

Alev sprej ve plazma sprej kaplamaların kalıp yüzeyinde önemli oranda aşınma direncine sahip olduğu gözlenmiştir.

- Dycote-39 ile poteyaj kaplama uygulaması yapılan kalıplar, diğer numunelere göre en iyi döküm yüzey kalitesi sonuçlarını göstermesine rağmen, ince kesitlerde kullanıldığında sıvı metalin kalıp içinde ilerlemesini kısıtlamaktadır. Kompleks şekilli ve ince kesitli parçaların dökümünde kullanılması halinde tam dolmama sorununun yaşanma olasılığı vardır. Buna karşılık sunduğu yüksek yüzey kalitesi nedeniyle, yüzey kalitesi açısından yüksek beklenti duyulan boya ve eloksallı kaplama gibi işlemlerin uygulanacağı parçalarda beklentileri karşılayabilecek düzeydedir.
- Genel bir sonuç olarak ince ve dar kesitlerde uygulanan Dycote 34 için optimum yüzey pürüzlülük değerleri; Ra:14,97µm Rz:54,36µm. Daha kalın ve geniş yüzeylerde ise Dycote 39 için optimum yüzey pürüzlülük değerleri Ra:5,34 Rz:28,80µm ‘dir.
- Poteyaj kaplamalarının uygulamalardaki en olumsuz özelliği zayıf kohezif dirençleri nedeniyle yeterli sertlik ve aşınma direnci sergileyememesidir. Yapılan sertlik ölçümlerinde ortalama HV0,025 10±5’dir.
- Poteyaj kaplama numunelerine uygulanan mikro sertlik testleri sonucunda, kaplamanın sertlikleri ile yoğunlukları arasında belirgin bir ilişkiye rastlanmıştır. Daha yoğun bir kaplama uygulaması olanağı sağlayan Dycote 39 numunesi 59±2 HV0.1 değerlerini verirken makro porozitelere sahip olan Dycote 34 numunesi iyi akışkanlık özelliği göstermesine karşın sertlik değerleri 12±2 HV0.1 olarak ölçülmüştür. Dycote 140 numunesi ise 18±4 HV0.1 sertlik değerleri ile diğer numunelerin arasında kalmıştır.
- Alev sprej kaplama ve plazma sprej kaplama işlemlerinde Magnezyum Stabilize Zirkonya (MSZ) tozu, MSZ’ye ağırlıkça %3 Bor Nitrür (BN) ilavesiyle elde edilmiş karışım tozu, MSZ tozuna ağırlıkça %3 Bor Nitrür (BN) tozu ve ağırlıkça %5-%10 Teflon (PTFE) tozlarının ilave edilmesiyle elde edilen karışım tozlarıyla birlikte 4 farklı toz kullanılarak kaplama işlemleri gerçekleştirilmiştir.
- Kaplama işlemlerinde kullanılacak olan kaplama tozlarının XRD analizlerinde Magnezyum Zirkonyum Oksit ve Magnezyum Oksit bileşenlerine rastlanmıştır.

olup karışım tozlarında buna ek Bor Nitrür bulunmaktadır. Ayrıca kaplama tozlarından alınan SEM görüntülerinde, bağ tabakada kullanılan tozun küresel tanelerden oluştuğu, seramik tabakada kullanılan MSZ ve karışım tozlarının ise keskin köşeli yapıya sahip olduğu görülmüştür. Kaplamada kullanılan tozların toz boyutları, MSZ için 80 µm olup dar bir dağılım şeklindedir. Karışım tozları geniş bir tane boyut dağılımına sahip olduğu görülmüştür.

- Alev sprej ve plazma sprej kaplama numunelerinde ortalama 170 ± 20 µm kalınlıklarda kaplama biriktiği gözlenirken ağırlıkça %10 PTFE katkılı olan kaplama tozu kullanılarak yapılan kaplamalarda beklenen kalınlıklara ulaşamadığı dikkat çekmiştir. Özellikle P.S-MBP10 numunesi en düşük 50 µm seviyelerinde düzensiz birikme kaydedilmiş olup bu değerler içinde bağ tabakası da bulunmaktadır. Bunun sebebi olarak PTFE tozunun plazma sıcaklığına dayanımı düşük olup kaplama sırasında yandığı düşünülmektedir.
- Yüzey pürüzlülükleri karşılaştırıldığında en pürüzlü yüzeylerin alev sprej kaplama numunelerine ait olduğu görülmüş olup sebebinin içerdiği yüksek porozite olması izlenimi vermektedir. Plazma sprej kaplama ile elde edilmiş yoğun numunelerin aynı zamanda kaliteli yüzey özelliğine sahip olduğu dikkat çekmektedir. P.S-MBP10 numunesinin 14,699 µm seviyesindeki yüksek pürüzlülük değerine sahip olmasının sebebi kaplamanın numunenin her yerinde homojen birikme gösterememesinden kaynaklanmaktadır.
- Üst yüzey mikroskopik incelemelere göre alev sprej yöntemiyle hazırlanmış olan numunelerde ergimemiş partiküller ve saçılmaya uğramış splatlar nedeniyle pürüzlü bir yüzey görüntüsü hâkimken plazma spreyleme ile hazırlanmış numunelerde daha düzgün bir yüzey görülmektedir. Özellikle P.S-MBP5 ve P.S-MBP10 numunelerinde üst yüzey görüntüsü A.S-MBP5 ve A.S-MBP10 numunelerine göre daha homojen ve pürüzsüz görünmektedir. Numunelerin kesit incelemelerinde ise numunelerin tatmin edici kalınlıklarda birikme gösterdiği görülmektedir. A.S-M, A.S-MB, A.S-MBP5 numunelerinde yüksek poroziteli kaplamalar olduğu dikkat çekerken A.S-MBP10 kaplamasında homojen olmayan kalınlık dağılımı ve kısmen yoğun bir kaplama yapısı görülmüştür. P.S-M, P.S-MB ve P.S-MBP5 numunelerinde

yoğun ve ideal kaplama kalınlıklarında kaplama birikmiş olmasına rağmen P.S-MBP10 numunesi kalitesiz kaplama özellikleri sergilemektedir.

- Kaplamaların XRD analizleri sonucuna göre yapılarda Magnezyum Zirkonyum Oksit bileşikleri ile Magnezyum Oksite rastlanmıştır. Karışım tozlarının yapısındaki Bor Nitrür fazları görülmektedir. Kaplama tozlarının XRD pikleri ile karşılaştırıldığında kaplama sonrasında amorflaşmalar olduğu dikkat çekmektedir. Plazma sprej numunelerinin amorflaşma miktarları alev spreje göre daha fazladır.
- Yapılan mikro sertlik ölçümleri sonucunda her iki yöntemde de bağ tabakanın sertliği yaklaşık değerlerde ölçülmüş olup 350 ± 50 HV0,1 olarak ölçülmesine rağmen seramik tabakanın sertlikleri alev sprej yönteminde ortalama 380 ± 50 HV0,1 olarak ölçülmüş olup PTFE katkılı numunelerin sertlikleri diğerlerine göre daha düşüktür. Plazma sprej kaplama numunelerinin seramik tabaka mikrosertlikleri ise çok daha yüksek değerler sergilemektedir ancak PTFE katkısı sertlik değerlerini düşürdüğünden tutarsızlıklar vardır. Ayrıca P.S-MBP10 numunesinde sertlik ölçümü yapılabilmesi için gerekli kaplama birikmediğinden ölçüm yapılamamıştır.
- Yapışma mukavemetlerinin ölçümü için ASTM C633 testi uygulanmıştır. Poteyaj kaplamaların ve diğer termal sprej kaplama numunelerinin adhesif dayanımları test sonuçlarına göre, poteyaj kaplama numunelerin 4 ± 5 MPa seviyelerindeyken alev sprej ve plazma sprej kaplama numunelerinin 50 MPa ile 60 MPa arasında değerlerde çıktığı görülmüştür.
- Sıvı metalin kalıba girişi ile kalıp sıcaklığının değişimi simülasyon programında incelenmiştir. Özellikle hub bölgesinde sıcaklıklar spoke bölgesine göre daha yüksektir. Genel olarak katılma nedenli problemlerde kalıbın soğutulması etkin rol oynamaktadır. Poteyaj kaplamalar bu noktada termal yalıtım görevini üstlenmektedir. Yüksek porozite oranında sahip termal sprej (alev sprej) kaplamalarında bu proje kapsamında başarılı bir şekilde kullanım potansiyeli söz konusudur. Kalıp içi sıvı metal akışını test eden ergiyik metal test kalıbı testlerinde alınan sonuçlarda sıvı metal akışı oldukça başarılıdır.

- Fabrika bünyesinde binlerce farklı tür ve tasarımda döküm kalıbı söz konusudur. Genel olarak simülasyon çalışmalarında sıcak zonlardan kaçınmaya, uygun soğutmanın sağlanmasına ve optimum kalıp dolum süresine bağlı proses parametreleri kontrol edilmeye çalışılmaktadır. Operatör etkisi söz konusu konuda oldukça kritik önem taşımaktadır.



KAYNAKLAR

- [1] Zeytin, H. Alüminyum Alaşımları Otomotiv Endüstrisinde Uygulamaları ve Geleceği, MAM MKTAE Proje No: 50H5602. 2000.
- [2] Brown, K.R., Venie, M.S., Woods, R. A . The Increasing Use of Aluminum in Automotive Applications, Journal of Metals, p.20. 1995.
- [3] European Aluminium Association (EAA) report, Aluminium in Cars; Sustainability of the European Aluminium Industry 2006.
- [4] Miller, W.S., Zhuang, L. Recent Development in Aluminium Alloys for the Automotive Industry, Materials Science and Engineering A280, p. 37. 2000.
- [5] Globe Newswire; Global and Chinese Automotive Wheel Industry Report, 2012-2013.
- [6] Türk Döküm Sanayicileri Derneği (Tüdoksad) ;Alüminyum Döküm Dosyası, Sayı 28. s.16-34, 2013.
- [7] CMS jant ve Makine San. Aş. www.cms.com.tr., Erişim Tarihi 08.04.2014.
- [8] EAA; Aluminium penetration in cars, Final Report 2012.
- [9] European Aluminium Association, The Aluminum usage in automotive, casting methods report 2002.
- [10] Wang Ying-chun. Li Da-yong. Peng Ying-hong. Zeng Xiao-qin, Numerical simulation of low pressure die casting of magnesium Wheel, Int J Adv Manuf Technol., 32: 257–264., 2007.
- [11] C. Blawert, N. Hort and K.U. Kainer, Automotive applications of magnesium and its alloys, Trans. Indian Inst. Met. Vol.57, No. 4, pp. 397-408. August 2004.
- [12] EAA, Cast aluminum designation systems (EN1706), 2012.
- [13] SAE, Wheels for Passenger Cars, Light Trucks, and Multipurpose Vehicles Standard: J1982, Revised: 07-01-2010.
- [14] Eva Tillová, Mária Chalupová and Lenka Hurtalová, Evolution of Phases in a Recycled Al-Si Cast Alloy During Solution Treatment, Scanning Electron Microscopy (Intecopen) Edited by Dr. Viacheslav Kazmiruk, Section 21, 411-437, 2012.
- [15] ASM Int. ,Aluminum and Aluminum Alloys Handbook, 2014.

- [16] Handbook of Aluminum: Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes, Editor: George E. Totten, D. Scott MacKenzie, Marcel Dekker, 2003.
- [17] Mattia Merlin, Gian Luca Garagnani, Mechanical and microstructural characterisation of A356 castings realised with full and empty cores, Metallurgical Science and Technology Vol. 27-1 - Ed. 2009.
- [18] L.Y. Pio, Effect of T6 Heat Treatment on the Mechanical Properties of Gravity Die Cast A356 Aluminium Alloy, J. Applied Science, 2048-2052, 2011/11.
- [19] R.J. Esdaile, T.T. Nguyen, G.R. de Looze, M.T. Murray (Eds.), Proceedings of the First International Non-Ferrous Processing and Technology Conference, TMS International, Warrendale, PA, pp. 213–218, 1997.
- [20] Y.H. Kim ; T.K. Ryou, H.J. Choi, B.B. Hwang; An Analysis of The Forging Process For 6061 Aluminum Alloy Wheels, Journal of Materials Processing Technologies 123, 270-276, 2002.
- [21] Yun Sung Han, Effect of Intermetallic Phases on the Mechanical Properties of Cast A356 Alloy Wheels; IEEE; IFOST, 338-341, 2006.
- [22] B. Zhang, D.M. Maijer, S.L. Cockcroft, Development of a 3D thermal model of the low-pressure die-cast (LPDC) process of A356 aluminum alloy wheels, Materials science & engineering A 464 295-305, 2007.
- [23] W. Muller, F.J. Feikus, Optimization of Low-Pressure Diecasting Process, AFS Trans. 104, 1111–1117, 1996.
- [24] M. Merlin, G. Timelli, F. Bonollo, G. L. Garagnani; Impact Behaviour of A356 Alloy For Low Pressure Die Casting Automotive Wheels, J. Materials Processing Technology 209, 1060-1073, 2009.
- [25] H. Jacobs; The Fatigue and Tensile Properties of A356 Aluminum Alloy Wheel in Various Post Cast Conditions, Rand African University, Mechanical Engineering Dept., Master Thesis, May., 2002.
- [26] M. Ishak, A. Amir, A. Hadi, Effect Of Solution Treatment Temperature On Microstructure And Mechanical Properties Of A356 Alloy, International Conference on Mechanical Engineering Research (ICMER2013), 1-3 July 2013.
- [27] B. Zhang, M. Garro, M. Leghissa, A. Giglio, et al., Effect of Dendrite Arm Spacing on Mechanical Properties of Aluminum Alloy Cylinder Heads and Engine Blocks, SAE Technical Paper 2005-01-1683, 2005.
- [28] L.Y. Zhang, Y.H. Jiang, Z. Ma, S.F. Shan, Y.Z. Jia, C.Z. Fan, W.K. Wang, Effect of cooling rate on solidified microstructure and mechanical properties of aluminium-A356 alloy, Journal of materials processing technology 207 107–111, 2008.
- [29] Q. Han S. Viswanathan Analysis of the Mechanism of Die Soldering in Aluminum Die Casting, Metallurgical And Materials Transactions A, Volume 34a, January, 139-2003.

- [30] Michel, F., Louchez, P. R., Samuel, F. H., “Heat transfer coefficient during solidification of Al-Si alloys: Effects of mold temperature, coating type and thickness”, AFS Transactions, 103: 275-283, 1995.
- [31] Hallam, C.P., Griffiths, W.D.,”A Model of the Interfacial Heat-Transfer Coefficient for the Aluminum Gravity Die-Casting Process”,Metallurgical and Materials Transactions B; 35 (4): 721-733, 2004.
- [32] Xiang Zhang, Optimization of Low-Pressure Die Casting Process with soft Computing, %1 içinde International Conference on Mechatronics and Automation, Harbin China, 2007.
- [33] Mi Guofa, Numerical simulation of low pressure die casting aluminum wheel, China Foundry, 2009.
- [34] Jörg C. Sturm, Optimized Development for Castings and Casting Process, %1 içinde World Foundry Congress 2002, Korea, 2002.
- [35] Zhang, Development of a 3-D thermal model of the low-pressure die-cast (LPDC) process of A356 aluminum alloy wheels, Materials Science and Engineering A 464, p. 295–305, 2007.
- [36] Srinivasan, M.N., “Heat transfer coefficients at the casting-mould interface during solidification of flake graphite cast iron in metallic moulds”, Indian Journal of Technology, 20(4): 123-129, 1982.
- [37] Yeh-Liang Hsu, Chia-Chieh Yu (2005-10-18); recommended: Yeh-Liang Hsu (2007-08-02)Computer Simulation of Casting Process of Aluminum Wheels – A Case Study, Journal of Engineering Manufacture, Vol. 220, No. 2, , p. 203-211, February, 2006.
- [38] Foseco international limited, www.foseco.com, Erişim Tarihi 19.03.2014.
- [39] M.C. Flemings: ‘Solidification Processing’; McGraw-Hill Inc.London, 1974.
- [40] Ekrem A. YSZ ve CSZ Esaslı Termal Bariyer Kaplamaların Üretimi, Karakterizasyonu ve Termal Çevrim Performanslarının Karşılaştırılması, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Doktora Tezi, 2011.
- [41] M. R. Dorfman, “19 - Thermal Spray Coatings,” in Handbook of Environmental Degradation of Materials(Second Edition), Oxford: William Andrew Publishing, pp. 569–596, 2012.
- [42] Simunovic K., Thermal Spraying, Welding Engineering and Technology, Eolss.net., Erişim Tarihi 01.02.2013.

ÖZGEÇMİŞ

Samet Türkan, 10.05.1989'da Bilecik'te doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Bilecik'te tamamladı. 2007 yılında Bilecik Anadolu Ticaret ve Meslek Lisesi'nden mezun oldu. 2008 yılında başladığı Afyon Kocatepe Üniversitesi Metal Öğretmenliği Bölümü'nü 2012 yılında bitirdi. 2012 yılında Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2013 yılında Sakarya Üniversitesi'nde Termal Sprey Araştırma ve Uygulama laboratuvarında proje asistanı görevi alarak çalışmaya başladı, akabinde yüksek lisans eğitimine Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde devam etti ve 01.08.2016-01.02.2017 tarihleri arasında izmir'de askerlik hizmetini tamamladı.