



**FARKLI İNSÖRT MALZEMELER KULLANILARAK TOZ ENJEKSİYON
YÖNTEMİ İLE KESİCİ TAKIM ÜRETİMİ**

Harun KOÇAK

**DOKTORA TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2018

Harun KOÇAK tarafından hazırlanan “FARKLI İNSÖRT MALZEMELER KULLANILARAK TOZ ENJEKSİYON YÖNTEMİ İLE KESİCİ TAKIM ÜRETİMİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Çetin KARATAŞ

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.



Başkan: Prof. Dr. Can ÇOĞUN

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Çankaya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Prof. Dr. Ulvi ŞEKER

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Prof. Dr. Adem KURT

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

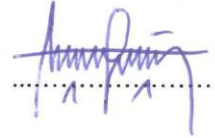
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Doç. Dr. Teyfik DEMİR

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, TOBB Ekon. ve Tekn. Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.



Tez Savunma Tarihi: 26/06/2018

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Harun KOÇAK

13/07/2018

FARKLI İNSÖRT MALZEMELER KULLANILARAK TOZ ENJEKSİYON YÖNTEMİ İLE KESİCİ TAKIM ÜRETİMİ

(Doktora Tezi)

Harun KOÇAK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2018

ÖZET

Toz Enjeksiyon Kalıplama (TEK), yönteminde daha büyük parçaların üretilebilmesi için insört adı verilen hazır bir parça kalıp içerisine yerleştirilerek üzerine toz enjeksiyon kalıplama yapılmaktadır. Yeni olarak geliştirilen bu yöntem İnsörtlü Toz Enjeksiyon Kalıplama (İTEK) olarak isimlendirilmektedir. Bu tez kapsamında, kesen kısmı WC-%9Co sap kısmı çelik malzemeden oluşan, kompozit T kanal freze çakısı İTEK yöntemiyle üretilmiş ve sonrasında işleme deneyleri yapılarak yekpare karbür T kanal çakıyla performansı karşılaştırılmıştır. Çakıyı oluşturacak kompozit parça üretimi için M2 HSS ve 4340 çelik insörtler kullanılarak WC-%9Co besleme stokuyla direk (katmansız) olarak parça üretimi ve ara bölgede Cu ve Ni ara katman kullanımı ön deneyler yapılarak araştırılmıştır. Ön deneylerden sonra M2 HSS ve 4340 çelik insörtlerin üzerine üç farklı kalınlıkta (25 µm-50 µm-100 µm) Ni ara katman uygulanarak üç farklı sıcaklıkta (1200 °C-1250 °C-1300 °C) ve üç farklı sürede (120 dak-240 dak-360 dak) sinterleme işlemi yapılmış ve optimum şartlar belirlenmiştir. Deneylerde en yüksek kesme dayanımı, 4340 insört ve 100 µm Ni ara katman kullanılarak, 1300 °C de 240 dak sinterleme işleminden sonra ara bölgede 290,4 MPa olarak elde edilmiştir. Belirlenen optimum şartlarda üretilen numunelerle burulma deneyi yapılmış ve deneylerde numunenin ara bölgesinin 12.13 Nm burulma torkuna dayanabileceği ve T kanal çakının çakının işleme esnasında 2021,66 N kesme kuvvetini karşılayabileceği tespit edilmiştir. Kompozit parça üretimi için yapılan deneylerden sonra T kanal çakısı için 4340 çelik insört hazırlanmış ve üzerine 100 µm Ni kaplanarak optimum şartlarda WC-%9Co besleme stokunun enjeksiyonu, bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemleri yapılmıştır. Sinterleme işleminin ardından üretilen kompozit parçalar taşlanarak T kanal çakı formuna getirilmiştir. Yekpare karbür T kanal çakı üretimine göre İTEK yöntemiyle T kanal çakı üretiminde taşlama işlemi %87,42 ve kullanılan WC-Co malzeme 29,2 kat azalmaktadır. Aynı şartlarda bilenmiş olan hem İTEK T kanal çakıyla hem de yekpare karbür T kanal çakıyla dört farklı kesme hızında (200, 300, 400, 500 m/dak) ve üç farklı ilerlemede (0,01-0,025-0,05 mm/diş) Al 7075 T6 malzeme üzerinde talaş kaldırma deneyleri yapılmıştır. Talaş kaldırma testlerinde kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü ölçülerek çakıların performansları karşılaştırılmıştır. İTEK T-kanal çakısıyla ortalama %25,69 daha düşük kesme kuvvetleri ve 0,01 mm/diş ilerleme değerinde %11,22 daha düşük yüzey pürüzlülükleri elde edilmiştir. İTEK yöntemiyle üretilen T kanal çakıyla herhangi bir hasar olmaksızın Al 7075 malzemesi başarıyla işlenmiştir. Elde edilen sonuçlar malzeme temini, maliyet, işçilik ve takım performansı bakımından İTEK yöntemiyle T kanal çakı üretiminin daha avantajlı olduğunu ortaya çıkarmaktadır.

Bilim Kodu : 91438

Anahtar Kelimeler : WC-Co, İTEK, T kanal freze çakısı, işleme performansı

Sayfa Adedi : 125

Danışman : Doç. Dr. Çetin KARATAŞ

CUTTING TOOL PRODUCTION BY POWDER INJECTION METHOD USING DIFFERENT INSERT MATERIALS

(Ph. D. Thesis)

Harun KOÇAK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2018

ABSTRACT

In order to produce bigger parts by Powder Injection Molding (PIM) method, the prepared component called insert is placed in the mold and powder injection molding is carried out on it. This newly developed method is named Inserted Powder Injection Molding (IPIM). In this thesis, composite T-channel cutter was produced with cutting part WC-% 9Co and shaft part made of steel material by IPIM method and after the composite T-channel cutter performance was compared with solid carbide T channel cutter via cutting experiments. The production of the composite parts was investigated directly from M2 HSS, 4340 steel inserts and WC-% 9Co feed stock and using Cu and Ni interlayers were investigated in the intermediate zone for composite T-channel milling cutter production in preliminary experiments. After preliminary tests, three different thicknesses (25 μm -50 μm -100 μm) of Ni intermediate layer were applied on M2 HSS and 4340 steel inserts and test parts were sintered at three different temperatures (1200 °C-1250 °C-1300 °C) and three different time (120 min-240 min-360 min) and optimum conditions were determined. In the experiments, obtained highest shear strength was 290,4 MPa in the intermediate zone after sintering at 240 minutes and 1300 °C using 4340 insert and 100 μm Ni interlayer. Torsion tests were carried out on specimens that produced under optimum conditions and they were determined that the intermediate zone of the specimen could withstand 12.13 Nm of torsional torque and T-channel cutter could operate up to a cutting force of 2021,66 N during the machining in the experiments. After the tests for composite part production, 4340 steel inserts were prepared and coated with 100 μm Ni on them for T-channel production and the injection, debinding and sintering processes of WC-% 9Co feedstock with insert were carried out. Produced composite parts were sharpened after sintering and brought into the form of a T-channel cutter. According to the production of solid carbide T-channel cutter, in the production of T-channel by IPIM method, the grinding process is 87.42% and the used WC-Co material is 29.2 times less. Cutting tests were carried out using both IPIM T channel cutter and solid carbide T channel cutter that sharpened for the same cutting conditions at four different cutting speeds (200, 300, 400, 500 m / min) and three different feeds (0,01-0,025-0,05 mm / tooth) on Al 7075 T6 material. Cutting forces and surface roughness were measured in the cutting tests and the performance of the T channel cutters was compared. They were obtained 25.69% lower cutting forces an average in all tests and 11.22% lower surface roughness at 0,01 mm /tooth feedrate using IPIM T channel cutter. The T-channel cutter produced by the IPIM method was able to successfully machine the Al-7075 material without any damage on tool. The obtained results reveal that T channel cutter production is more advantageous with IPIM method in terms of material supply, cost, workmanship and tool performance.

Bilim Kodu : 91438

Anahtar Kelimeler : WC-Co, IPIM, T channel cutter, machining performance

Sayfa Adedi : 125

Danışman : Assoc. Prof. Dr.Çetin KARATAŞ

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince desteğini esirgemedi enin bilgi birikimi ve katkılarıyla beni yönlendiren ve sayesinde akademik hayatımda birçok tecrübeler elde etmiş olduğum danışmanım Sayın Doç. Dr. Çetin KARATAŞ'a, saygı ve şükranlarımı sunarım. Değerli bilgilerinden faydalandığım Tez İzleme Komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Ulvi ŞEKER'e ve Sayın Prof. Dr. Adem KURT'a, tez çalışmamda emeği geçen Sayın Dr. Mehmet SUBAŞI'ya, Sayın Dr. Asgar SAFARIAN'a, Sayın Dr. Gültekin UZUN'a ve Doç Dr. Ercan GÜRSES'e laboratuvar çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Sayın Kamran SAMET'e ve Sayın Oğuz YILMAZ'a teşekkür ederim. Ayrıca tezin ortaya çıkmasında, 07/2016-21 kodlu "Toz Enjeksiyon Kalıplama yöntemiyle HSS insört ve WC-Co besleme stoku kullanılarak parça üretiminin araştırılması " konulu proje ile desteklediği için Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne, ve 115M437 kodlu "İnsörtlü Toz Enjeksiyon Kalıplamada (İTEK) Yöntemi İle Yüksek toklukta Sementit Karbür Frezeleme Takımlarının Geliştirilmesi" konulu projesi ile TÜBİTAK'a ayrı ayrı teşekkür ederim. Yekpare karbür çakının temini ve bu tez kapsamında üretilen T kanal çakısının bileneşmesi konusundan destek olan Karcan Kesici Takım San. Tic. Ltd. Şti.'ye teşekkür ederim. Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini esirgemeyen ailemin tüm fertlerine ve tez çalışmamın yoğunluğundan ilgilenemediğim sevgili eşime sabır ve desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR.....	3
2.1. Co Enjeksiyon Ve İnsört Kullanımı.....	3
2.2. Farklı Malzemelerin Birleştirilmesinde Ara Katman Kullanımı	6
2.3. Tungsten Karbürün (WC) Sinterlenmesiyle İlgili Yapılan Çalışmalar.....	8
2.4. Tek Yöntemiyle Kesici Takım Üretimi.....	11
2.5. İşlenebilirlik Çalışmaları.....	12
2.6. Literatür Özeti ve Değerlendirme	13
3. KURAMSAL TEMELLER	15
3.1. Toz Enjeksiyon Kalıplama.....	15
3.1.1. Toz enjeksiyon kalıplamada kullanılan tozlar	16
3.1.2. Toz enjeksiyon kalıplamada kullanılan bağlayıcılar.....	17
3.1.3. Toz enjeksiyon kalıplamada reoloji	19
3.1.4. Kalıplama.....	19
3.1.5. Bağlayıcının giderilmesi	21
3.1.6. Sinterleme	22

	Sayfa
3.2. Difüzyon.....	23
3.2.1. Kararlı hal difüzyonu	24
3.2.2. Kararsız hal difüzyonu	25
3.2.3. Difüzyon mekanizmaları	27
3.2.4. Difüzyonu etkileyen faktörler	29
3.3. WC-Co Sistemi	30
3.3.1. WC-Co sisteminin fiziksel ve mekanik özellikleri	31
3.3.2. WC-Co sisteminin sinterlenmesi.....	32
3.3.3. WC-Co'ın kullanım alanları.....	35
3.4. Metal ve Seramik Malzemelerin Birleştirilmesi	35
3.4.1. Metal- seramik birleştirmelerde ara katman kullanımı	37
3.5. Frezeleme	39
3.5.1. Frezelemede talaş kaldırma	40
3.5.2. Frezelemede takım geometrisi	40
3.5.3. Frezeleme oluşan kesme kuvvetleri	41
3.5.4. Yüzey pürüzlülüğü	42
4. MALZEME VE YÖNTEM	45
4.1. Malzeme	45
4.1.1. Besleme stoku	45
4.1.2. İnsört olarak kullanılan malzemeler	45
4.1.3. Ara katman Seçimi	46
4.1.4. Performans testlerinde kullanılan malzeme	46
4.2. Yöntem	47
4.2.1. İnsörtlerin hazırlanması	47

	Sayfa
4.2.2. Ara katman malzemesinin insört üzerine uygulanması	47
4.2.3. Termogravimetrik analiz (TGA) analizi	50
4.2.4. İnsörtlü toz enjeksiyon kalıplama	51
4.2.5. Kimyasal çözücüyle bağlayıcı giderme işlemi	53
4.2.6. Sinterleme işlemi	53
4.2.7. Sinterleme sonrası boyutsal çekme ve yoğunluk ölçümü	54
4.2.8. Mekanik testler.....	55
4.2.9. Burulma deneyi.....	56
4.2.10. Mikroyapı analizleri ve element geçişleri.....	57
4.2.11. Deney tasarımı ve ön deneyler	57
4.2.12. İTEK yöntemi ile T-kanal frezeleme takımının imalatı.....	59
4.2.13. İTEK T kanal çakı ve yekpare karbür T kanal çakının bilenmesi	60
4.2.14. İTEK yöntemiyle geliştirilen T-kanal çakı ile yekpare karbür T-kanal çakının performanslarının karşılaştırılması.....	61
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	65
5.1. Ön Deneylerde Elde Edilen Sonuçlar	65
5.1.1. Ara katmansız olarak WC-Co/HSS parça üretimi	65
5.1.2. Ara katmansız olarak WC-Co/4340 parça üretimi.....	67
5.1.3. Ara katman kullanımı	69
5.2. Sinterleme Öncesi Nikel Kaplamanın İncelenmesi.....	74
5.3. TGA, Enjeksiyon ve Bağlayıcı Giderme İşlemleri	75
5.4. Sinterleme Sıcaklığının ve Süresinin Etkisi.....	77
5.4.1. Sinterleme sıcaklığının ve süresinin boyut değişimine etkisi	77
5.4.2. HSS İnsört ve ara bölgenin sıcaklığa göre davranışı	78
5.4.3. Sinterleme sonrası enjekte kısmın (WC-%9Co) incelenmesi.....	79

	Sayfa
5.5. Sinterleme Sonrası Yoğunluk	82
5.6. Sinterleme Sonrası Sertlik.....	82
5.6.1. WC-Co'ın sertliği.....	82
5.6.2. HSS insörtün sertliği ve ara bölgenin sertlik profili.....	83
5.6.3. 4340 insörtün sertliği ve ara bölgenin sertlik profili.....	84
5.7. Element Geçişleri.....	85
5.7.1. HSS/Ni/WC-Co ara bölgesindeki element geçişleri	86
5.7.2. 4340/Ni/WC-Co ara bölgesindeki element geçişleri.....	87
5.7.3. Element geçişlerinin değerlendirilmesi.....	88
5.8. Ara Bölgedeki Mikroyapı	89
5.9. WC-Co/İnsörtün Ara Bölgesinin İncelenmesi	90
5.9.1. WC-Co/Ni/HSS ara bölge	90
5.9.2. WC-Co/Ni/4340 ara bölge	91
5.10. Birleşme Bölgesinin Kesme Mukavemeti.....	94
5.10.1. HSS insört ve Ni ara katman kullanılarak üretilen numunelerin ara bölgelerindeki kesme mukavemeti.....	94
5.10.2. 4340 insört ve Ni ara katman kullanılarak üretilen numunelerin ara bölgelerindeki kesme mukavemeti.....	96
5.10.3. Kesme mukavemeti bakımından insörtlerin karşılaştırılması	98
5.11. Birleşme Bölgesinin Burulma Dayanımı	99
5.12. Performans Testleri Öncesinde Teorik Kesme Kuvvetinin hesaplanması.....	101
5.13. Takım Performanslarının İncelenmesi	102
5.13.1. Kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü bakımından çakıların karşılaştırılması	103
5.13.2. İşleme sonrası takım ve iş parçasının incelenmesi.....	108

Sayfa

5.14. Yekpare Karbür T Kanal Çakısıyla İTEK T Kanal Çakısının Malzeme ve İşçilik Bakımından Karşılaştırılması	109
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	111
6.1. Sonuçlar	111
6.1.1. T Kanal çakısı üretimi ve işleme performansı için elde edilen sonuçlar.....	111
6.1.2. Ara katman kullanımı için elde edilen sonuçlar.....	112
6.1.3. 4340 insört kullanılarak elde edilen sonuçlar.....	112
6.1.4. HSS insört kullanılarak elde edilen sonuçlar	112
6.2. Öneriler	113
KAYNAKLAR	115
ÖZGEÇMİŞ.....	125

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Bazı malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan ara tabakalar ve elde edilen mukavemet değerleri	8
Çizelge 3.1. TEK için ideal toz özellikleri.....	17
Çizelge 3.2. Tipik bağlayıcı örnekleri.....	18
Çizelge 3.3. Bağlayıcı giderme yöntemleri.....	21
Çizelge 3.4. WC tabanlı bazı sert metallerin özellikleri	32
Çizelge 3.5. Literatürde ara katman olarak kullanılan mataller ve özellikleri.....	39
Çizelge 4.1. WC- %9 Co besleme stoğunun özellikleri.....	45
Çizelge 4.2. WC malzemenin fiziksel özellikleri	45
Çizelge 4.3. İnsört olarak kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimi	46
Çizelge 4.4. Al 7075 T6 malzemenin kimyasal bileşimi	46
Çizelge 4.5. Al 7075 T6 malzemenin mekanik özellikleri	46
Çizelge 4.6. Elektrolitik nikel ve bakır kaplama şartları	48
Çizelge 4.7. Besleme stoğu üretici firmanın tavsiye ettiği enjeksiyon parametreleri....	52
Çizelge 4.8. Kullanılan enjeksiyon parametreleri.....	53
Çizelge 4.9. Ön deneyler.....	58
Çizelge 4.10. Deney tasarımı	59
Çizelge 5.1. Sinterleme sonrası WC-%9Co'nın (%) boyutsal çekme miktarları.....	77
Çizelge 5.2. Sinterleme sonrası WC-Co'nın sertliği.....	82
Çizelge 5.3. Sinterleme sonrası HSS insörtün sertliği	83
Çizelge 5.4. Sinterleme sonrası 4340 insörtün sertliği	84
Çizelge 5.5. HSS insört kullanılan parçada yapılan noktasal element analizi değerleri	87
Çizelge 5.6. 4340 insört kullanılan parçada yapılan noktasal element analizi değerleri .	88

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.7. Ara bölgenin kesme mukavemeti	99
Çizelge 5.8. Optimum deney şartları	99
Çizelge 5.9. Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü sonuçları	103

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. TEK yönteminin aşamaları	15
Şekil 3.2. Toz metalurjisinde kullanılan toz şekilleri	17
Şekil 3.3. Kalıplamada işlem basamakları	20
Şekil 3.4. Sinterleme aşamasında tozlar arasında boyun oluşumu	23
Şekil 3.5. Kararlı Hal Difüzyonu	25
Şekil 3.6. Kararsız hal difüzyonu.....	26
Şekil 3.7. Ara yer difüzyonu	27
Şekil 3.8. Boşluk difüzyonu.....	28
Şekil 3.9. Tane sınırı difüzyonu	29
Şekil 3.10. WC-Co için sinterleme döngüsü.....	33
Şekil 3.11. WC-Co faz diyagramı.....	34
Şekil 3.12. Metal-Seramik birleştirme yöntemleri.....	35
Şekil 3.13. Seramik-metal malzemelerin birleştirilmesiyle üretilen parçalar.....	37
Şekil 3.14. Freze tezgahı	39
Şekil 3.15. Frezeleme işlemleri ve kullanılan freze çakıları	40
Şekil 3.16. Freze çakısına verilen açılar	41
Şekil 3.17. Frezelemede oluşan kuvvetler	42
Şekil 3.18. Yüzey pürüzlülüğü.....	43
Şekil 4.1. İnsörtün yüzey alanı.....	49
Şekil 4.2. İnsörtlü toz enjeksiyon kalıplama işlemi	51
Şekil 4.3. Deney numunesi	52
Şekil 4.4. 1200°C sıcaklıktaki sinterleme için sıcaklık-zaman döngüsü	54
Şekil 4.5. Kesme testinde kullanılan kalıp.....	55

Şekil	Sayfa
Şekil 4.6. a) İnsörtlü numune b) Burulma deneyleri için taşlanmış insörtlü numune ...	56
Şekil 4.7. Burulma dayanımı ölçümü için tasarlanan deney düzeneği	56
Şekil 4.8. T kanal çakı insörtü	60
Şekil 4.9. T kanal çakının ölçüleri	61
Şekil 4.10. Ön kanal ve T kanal açma işlemi.....	62
Şekil 4.11. Kesme kuvvetlerinin ölçümü.....	64
Şekil 5.1. Fe-Fe ₃ C denge diyagramı	67
Şekil 5.2. 1300 C sinterleme sonrası 4340 insört/ WC-Co ara bölge	68
Şekil 5.3. Ni ara katman ve HSS insört kullanılarak üretilen numunenin ara bölgesi...	72
Şekil 5.4. HSS /Ni/WC-Co numunenin kesme deneyinde oluşan yük grafiği.....	72
Şekil 5.5. 50 µm Ni ara katman ve 4340 insört kullanılarak üretilen numunenin ara bölgesi	73
Şekil 5.6. 4340/Ni/WC-Co numunenin kesme deneyinde oluşan yük grafiği.....	74
Şekil 5.7. Kaplama sonrası kaplama/insört ara yüzeyi	75
Şekil 5.8. Nikel kaplamanın sinterleme öncesi mikrosertliği	75
Şekil 5.9. Termo Grametrik Analiz Grafiği	76
Şekil 5.10. Sinterleme sıcaklığının ve süresinin boyutsal çekmeye etkisi.....	78
Şekil 5.11. WC-Co sinterleme sonrası görüntüsü.....	80
Şekil 5.12. Sinterleme sonrası numunelerin kesit görüntüsü.....	81
Şekil 5.13. Sinterleme sıcaklığı ve süresinin WC-%9Co'ın sertliğine etkisi	83
Şekil 5.14. Sinterleme sonrası HSS insörtün sertliği	83
Şekil 5.15. HSS insört kullanılan numunenin ara bölgesindeki sertlik profili.....	84
Şekil 5.16. Sinterleme sonrası 4340 insörtün sertliği	85
Şekil 5.17. 4340 insört kullanılan numunenin ara bölgesindeki sertlik profili.....	85
Şekil 5.18. EDS analizi yapılan bölge	86

Şekil	Sayfa
Şekil 5.19. Ara bölgedeki element konsantrasyon profili.....	87
Şekil 5.20. Ara bölgedeki element konsantrasyon profili.....	88
Şekil 5.21. Ara bölgedeki mikroyapı	89
Şekil 5.22. HSS insört ve 100µm Ni ara katman kullanılarak üretilen numunenin mikro görüntüsü	90
Şekil 5.23. HSS insört ve 100µm Ni ara katman kullanılarak üretilen numunenin ara bölgesi	91
Şekil 5.24. 4340 insört ve 50 µm Ni ara katman kullanılan numunede çatlak oluşumu	92
Şekil 5.25. 4340 insört ve 100µm Ni ara katman kullanılarak üretilen numunenin ara bölgesi	92
Şekil 5.26. WC-Co/Ni ve Ni/4340 ara yüzeylerin mikroyapısı	94
Şekil 5.27. HSS insört kullanılan numunelerde sinterleme süresinin kesme dayanımına etkisi	96
Şekil 5.28. 4340 insört kullanılan numunelerde sinterleme süresinin kesme dayanımına etkisi	97
Şekil 5.29. 1200 °C sıcaklıkta 360 dakika süreyle sinterlenen numunenin kesme deneyi sonrası görüntüsü.....	97
Şekil 5.30. 4340 insört kullanılan numunelerde sinterleme süresinin kesme dayanımına etkisi	98
Şekil 5.31. Tork-burulma açısı grafiği.....	100
Şekil 5.32. İşleme sırasında oluşan Ft kuvveti.....	101
Şekil 5.33. Frezeleme işleminde takım ve malzeme.....	101
Şekil 5.34. Farklı ilerleme oranlarında kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması..	105
Şekil 5.35. Farklı ilerleme oranlarında yüzey pürüzlülüğünün karşılaştırılması	107
Şekil 5.36. Yekpare karbür ve İTEK çakıların taşlama aşaması.....	110

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. WC-%9Co besleme stoku.....	45
Resim 4.2. Kullanılan insörtler ve ölçüleri	47
Resim 4.3. Elektrolitik kaplama sistemi	48
Resim 4.4. Kaplanan insörtler.....	50
Resim 4.5. maXXi 5 X-ray ölçme cihazı.....	50
Resim 4.6. Deneylerde kullanılan enjeksiyon kalıpları	52
Resim 4.7. Deney numunelerinin çözücüyle bağlayıcı giderme işlemi.....	53
Resim 4.8. a: Sinterleme Fırını, b: Sinterlenmiş Numuneler	54
Resim 4. 9. Burulma deney cihazı ve deney sonrası kırılmış numunenin kalıp içerisindeki görüntüsü	57
Resim 4.10. İTEK T kanal çakısının üretim aşaması.....	60
Resim 4.11. Performans testleri için hazırlanan deney düzeneği	63
Resim 4.12. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü.....	64
Resim 5.1. Ön deneylerde sinterlenen HSS/WC-Co numuneler	66
Resim 5.2. Bakır ara katman kullanımı	70
Resim 5.3. 1300°C de sinterlenen numuneler.....	70
Resim 5.4. Kaplama sisteminin optimizasyonunda kullanılan numuneler	74
Resim 5.5. Deney numunesinin enjeksiyon sonrası görüntüsü.....	77
Resim 5.6. Mekanik testler sonucu kırılan parçalar.....	79
Resim 5.7. İşleme sonrası açılan kanal ve İTEK T kanal freze çakısı.....	108
Resim 5.8. 200 m/dak kesme hızı ve 0,01 mm/diş ilerlemede açılan kanal	108
Resim 5.9. 0,05 mm/diş ilerleme değerinde açılan kanal	109
Resim 5.10. 0,05 mm/diş ilerleme değerinde yapılan işlemeden sonra T kanal çakıları.....	109

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A	Kesilen alan (mm^2)
D	İnsört çapı (mm)
F_{kal}	Kaldırma kuvveti (N)
F_t	Teğetsel kuvvet (N)
J	Difüzyon akısı
L	Boy
M2	Takım çeliği
P	Basma testinden elde edilen kuvvet (N)
T	Enjeksiyon kalınlığı (mm)
v	Hacim (cm^3)
V_{bB}	Batan hacim (cm^3)
YA	Yüzey alanı
YK	Yekpare karbür
ρ	Sıvının yoğunluğu (g/cm^3)

Kısaltmalar	Açıklamalar
HMK	Hacim Merkezli Kübik Yapı
İTEK	İnsörtlü Toz Enjeksiyon Kalıplama
SFG	Sıvı Faz Geçiş
TEK	Toz Enjeksiyon Kalıplama
TGA	Termogravimetrik Analiz
TGK	Termal Genleşme Katsayısı
TM	Toz Metalurjisi
YMK	Yüzey Merkezli Kübik Yapı

1. GİRİŞ

Toz enjeksiyon kalıplama yönteminde (TEK) toz halindeki malzemeler bağlayıcıyla karıştırılıp akışkanlık kazandırılarak plastik enjeksiyon makinesi yardımıyla metal kalıp içerisine aktarılır. Kalıp içerisinde bağlayıcı katılarak ham mamul elde edilir. Sonraki aşamada bağlayıcı bileşenlerinden bir kısmı çözündürmeyle alınır ve parça sinterlenir. Sinterleme esnasında parça içerisindeki bağlayıcı tamamen giderilirken tozların birbirine difüzyonu sağlanarak parça üretimi gerçekleştirilmiş olur. Bu yöntemle yüksek yoğunluklu metal, seramik, kompozit ve intermetal malzemelerden geometrik hassasiyete sahip küçük parçaların üretimi seri ve ekonomik olarak yapılabilir. Üretilen parça sayısı fazla ise TEK yöntemi üretim maliyetleri bakımından diğer yöntemlere göre daha avantajlıdır (Safarian, 2015). Literatürde TEK yöntemi ile üretilen parçanın kalınlığının en fazla 10 mm civarında olması gerektiği belirtilmektedir (Liu, 2012; Heaney, 2012). Kalınlığın 10 mm civarında sınırlandırılmasının nedeni, parça kalınlığı arttığında bağlayıcının uzaklaştırılmasının zorlaşması, parça üretim zamanının artması ve neticede üretim maliyetinin yükselmesidir (Safarian, 2015). Büyük parçaların üretilmesi için bağlayıcı giderme işlemlerinin hızlı ve uygun bir şekilde yapılması gerekir. Bunu mümkün kılmak için ısıtma, çözücü, kılcal, katalitik gibi farklı bağlayıcı giderme yöntemleri geliştirilmiştir (German ve Bose, 1997; Heaney, 2012). Parça büyüklüğü belirli bir sınırı geçtiğinde bağlayıcının hızlı bir şekilde giderilmesi parça geometrisini etkilemektedir.

Son yapılan çalışmalarda TEK yöntemiyle büyük parçaların üretilmesi için insörtlü toz enjeksiyon kalıplama (İTEK) yöntemi geliştirilmiştir (Safarian, Subaşı ve Karataş, 2015). İnsört adı verilen hazır bir parça kalıp içerisine yerleştirilerek üzerine toz enjeksiyon yapılmaktadır. Kullanılan insört sayesinde enjekte kısmının et kalınlığı azaltılarak bağlayıcı giderme işlemi kolaylaşmakta ve daha büyük parçaların TEK yöntemiyle üretilmesine imkan sağlanmaktadır. İnsört ve enjekte kısımda aynı metal malzemeler kullanıldığında sağlam bir birleşme elde etmek mümkündür. Ancak metal insört ve seramik enjeksiyonla parça üretiminde malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı ara kesitte sağlam birleşme elde etmek mümkün olmayabilir. Bu sorun çözülebildiği takdirde dış kısmı seramik, sert ve aşınmaya dayanıklı iç kısmı ise daha ucuz ve tokluk sağlayan metal malzemelerden oluşan nitelikli parçalar İTEK yöntemiyle daha seri olarak üretilir. Seramik malzemeler genel olarak aşınma direnci bakımından metal malzemelerden daha avantajlıdır. Bu nedenle kesici takım üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Hatta

WC malzemenin %70'e yakını kesici takım üretiminde kullanılmaktadır. WC malzemedan kesici takım üretimi toz metalürjisi (TM) ve TEK yöntemleriyle yapılabilmektedir. Ancak literatürde TM yöntemiyle üretilen parçalara göre TEK yöntemiyle daha yüksek yoğunlukta ve mukavemette seri olarak ekonomik üretim yapılabileceği belirtilmektedir (Sung ve diğerleri, Ko ve diğerleri). Bu iki yöntem sadece sökölüp takılabilen uçların üretimi bakımından karşılaştırılmamalıdır. Parmak freze çakısının üretimi düşünüldüğünde helisel kanallarından dolayı TM yöntemiyle bu takımı üretmek mümkün olmayabilir. Bu durumda WC-Co malzeme çubuk şeklinde sinterlenip helisel kanallar taşlamayla açılmaktadır. WC-Co malzemenin taşlanması da maliyetli bir işlemdir. Fakat TEK yöntemi parça tasarımı bakımından TM yöntemine göre daha serbest olduğu için freze çakısı bütünüyle kalıplanarak taşlama işlemleri çok aza indirilebilir. Hatta sap kısmı çelik kesme yapan kısmı WC-Co malzemedan frezeleme takımının İTEK yöntemi üretimi, hem imalat işlemleri hem de WC-Co malzeme kullanımını azaltmak için birçok yönden avantajlı olduğu açıktır. Ancak literatüre yeni kazandırılan İTEK yöntemiyle farklı malzemelerden parça üretimi konusunda yapılan çalışmalar sınırlıdır ve bununla birlikte İTEK yönteminde enjekte bölgeyle insört arasında ara katman kullanımıyla ilgili detaylı bir çalışma yoktur. Bu nedenle bu konuda öncelikli olarak ortaya çıkabilecek difüzyon ve birleştirme sorunları deneysel olarak tespit edilerek çözülmeli ve bu yöntemle üretim yapılırken şartlar optimize edilmelidir.

Yapılan bu tez çalışmasında İTEK yöntemiyle parça üretilirken yeni olarak hem farklı malzemelerden oluşan insört ve besleme stoku kullanımı hem de ara katman kullanımı araştırılmıştır. Bunun için iç kısımda HSS ve 4340 çelik insört dış kısımda WC-Co malzeme kullanılarak İTEK yöntemiyle parça üretimi araştırılmış ve optimum şartlar belirlendikten sonra sap kısmı 4340 insört ve kesen kısmı WC-Co'dan oluşan, T kanal freze çakısı bu yöntemle üretilmiş ve işleme performansı incelenmiştir. Çelik ve WC-Co malzemelerinin ara bölgesinde daha iyi difüzyon sağlayabilmek için Ni ve Cu ara katman kullanılmış ve kesme dayanımına etkisi araştırılmıştır. Deneyler neticesinde elde edilen optimum şartlarda İTEK yöntemiyle T kanal freze çakısının üretimi yapılmış ve kesme performansı yekpare karbür T kanal çakısıyla karşılaştırılmıştır.

2. LİTERATÜR

2.1. Co Enjeksiyon ve İnsört Kullanımı

Safarian (2015), TEK yönteminde insört kullanarak daha büyük parçaların üretimini araştırmıştır. Bunun için 316L paslanmaz çelik silindirik parça üzerine aynı malzeme tozları enjekte edilmiş ve sinterlenerek TEK yöntemiyle daha büyük parça üretimi sağlanmıştır. Sinterleme şartlarının, esas malzeme (besleme stoğu) ile insört malzemesi arasındaki birleşmeye etkisi incelenmiştir. İnsört/parça çap oranına bağlı olarak bağlayıcı giderme zamanı %90 azaltılmıştır. Çalışma sonucunda insört ile esas malzeme (besleme stoğu) arasındaki difüzyonda, sinterleme sıcaklığı ve insört çap oranının en etkin faktörler olduğu tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü büyüdükçe daha iyi birleşme sağlanmaktadır. Deneyler sonucunda insört ve esas malzeme (besleme stoğu) arasında en yüksek 360 MPa kesme dayanımı elde edilmiştir. Yapılan araştırmanın TEK yöntemiyle insört kullanarak daha büyük parçalar üretmek için literatürde ilk olduğu belirtilmektedir.

Tan, Baumgartner ve German (2001), mıknatıslanma özelliği olan ve olmayan iki farklı malzeme ile bir parça üretimini çalışmışlardır. Çalışmalarında ilk olarak mıknatıslanma özelliği olmayan malzemeden bir parça üretmişler ve daha sonra bu parçayı kalıp içerisine yerleştirip dışına mıknatıslanma özelliği olan malzemeyi enjekte etmişlerdir. TEK yöntemi ile üretilen numuneye bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemi uygulamışlardır ve iki parçanın birbirine difüzyonunu incelemişlerdir. Araştırma sonucunda iki parçanın da küçüldüğünü ve aralarında küçülmeden kaynaklanan çatlaklar meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

Guo, Lian, Zhong, Xiong, Wan, (2015) Ti(C,N)-Mo₂C-Ni tozlarına farklı oranlarda WC ekleyerek preslemişler ve içi boş silindirik şekilde parça üretmişlerdir. Elde edilen parçanın içerisine silindirik çelik malzeme yerleştirerek sinterleme esnasında difüzyonla birleştirmişlerdir. SEM ve EDS analizleriyle iki malzeme arasındaki birleşme bölgesi incelenerek WC oranının etkisi araştırılmıştır. Ara kesitte dıştan içeriye doğru Ni bakımından zengin olan(A), Fe ve Ni'in difüzyon olduğu (B), östenit (C), martenzit (D) olarak 4 farklı bölge oluşmaktadır. WC eklendikten sonrasermet malzemenin iç kısımdaki çeliğe sıkı temasıyla ve hızlı azot çözünümünden dolayı birleşme bölgesinin kalınlığı artmıştır fakat %15 WC eklendikten sonra çözünen ve difüze olan Ti, W ve Mo tarafından

çekildiği için azalmaktadır. Sonuç olarak birleşme bölgesinin kalınlığı arttıkça sermet ve çelik malzemelerin termal genleşme katsayıları arasındaki uyumsuzluğun azaldığını belirtmişlerdir.

Nie, Liu, Li, Du, Zhang, Zhuang (2014) bir pota içerisine Ti mili ve etrafına Al parçalarını yerleştirmişler ardından fırın içerisinde alüminyumun erimesiyle insörtlü Ti-Al kompozit malzeme elde etmişlerdir. Elde edilen malzemenin mikroyapısı, element dağılımı, mekanik özellikleri ve birleşme bölgesi incelenmiştir. Ti insört ve Al matriks arasında $TiAl_2$ ve $TiAl_3$ intermetalik fazlar oluşmasıyla iki malzeme arasında iyi bir metalurjik bağ elde edilmiştir. Ara yüzeyin sertliği alt katmanlara bağlı olarak değişmiştir. Ara yüzeyde oluşan intermetalik katmanların sertliği Ti ve Al den yüksektir ve en yüksek değeri 520 HV olarak ölçülmüştür. Ara yüzeyin sertliği intermetalik fazların miktarına bağlı olarak değişmiştir. Al matriksin kesme dayanımı 43 MPa olmasına rağmen ara yüzeyde oluşan katmanın kesme dayanımı 60MPa olarak tespit edildiği belirtilmektedir.

Rodelas, Hilmas, Mishra, (2009) WC-Co ile demir-nikel-tungsten alaşımını, yüksek sıcaklıklarda çalışabilen parça yapımında kullanmak için sinterlemeyle birleştirmişlerdir. Birleştirme işleminde demir-nikel tungsten alaşımı malzeme insört olarak kullanılmıştır. İnsört halindeki tungsten alaşımı üzerine WC-Co preslenmiştir. Daha sonra elde edilen numuneler sıcak preslemeyle ve basınçsız sinterlemeyle birleştirilmiştir. Birleştirme işlemi sonrası ara yüzeyde oluşan kusurlar incelenmiştir. Sıcak preslemeyle elde edilen parça sürtünme kaynağında kullanılan sürtünme başlığı için uygun olduğu ancak farklı malzeme çekme oranlarından kaynaklanan boşluk ve birleşmeyen kısımların oluşmasından dolayı, basınçsız sinterlemenin birleştirme işlemi için uygun olmadığı belirtilmiştir

Johnson, Tan, Suri, German, (2003) TEK yöntemi ile (ko-enjeksiyon) iç ve dış kısımları farklı malzemelerden oluşan silindirik şekilde parça üretip, iç ve dış parçanın arasındaki gerilimi inceleyerek en uygun difüzyon oluşumunu araştırmışlardır. Deneylerde üretilen parçalar seramik-çelik ve çelik-çelik malzemelerden oluşmaktadır. Uygun difüzyonun sağlanabilmesi için malzemeler yapısal ve kimyasal olarak benzer özellikte olması gerektiğini ve ayrıca parçaların farklı çekme miktarlarından dolayı ara yüzeyde basınç oluşmasıyla difüzyonun arttığını belirtmişlerdir.

Li, Fuh, Ching, Yu, Lu, (2009) ko-enjeksiyon yöntemiyle dış kısmı tok malzemeden, iç kısmını ise WC-0,5wt%Co-0,5wt%VC-4,5wt%W olan sert malzemeden oluşan iç içe geçen silindirik şekilde parça üretimini araştırmışlardır. Elde edilen parçanın ara yüzeyindeki sertlik değerlerini, mikro yapısını ve element dağılımını incelemişlerdir. İç yüzeyi sert dış yüzeyi ise tok olması gereken su jeti nozulu gibi parçaların bu yöntemle daha ucuz ve daha uzun ömürlü olarak üretilebileceği belirtilmektedir.

Ruh, Dieckmann, Heldele, Piotter, Ruprecht, Munzinger, Fleischer, Haußelt, (2008) Co-enjeksiyon yöntemiyle farklı malzemelerden parça üretilebilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada iç kısmı alümina mil ve dış kısmı zirkronyadan oluşan dişli üretilmiştir. Sinterlemeden sonra mil ve dişli arasındaki bağlantı şekli incelenmiştir. İç ve dış kısımdaki malzemelerin sinterlemedeki çekme miktarlarının kontrol edilerek mil ve dişli arasında serbest hareketli geçme veya sabit bağlantı elde edilebileceğini ve malzemeler arasında termal genleşme katsayısı farkının önemli olduğunu belirtmektedirler.

Heaney, Surı, German, (2003) iki farklı malzemeden toz enjeksiyon kalıplama yöntemiyle hatasız olarak parça üretilebilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada 316L paslanmaz çelik M2 takım çeliği ve Fe-Cr alaşımı malzemeler kullanılmıştır. Malzemelerin dilatometreyle çekme miktarları belirlenmiştir. Farklı malzemeler üst üste enjekte edilerek sinterlenmiş ve sinterleme sonrası oluşan hatalar incelenmiştir. Malzemelerin çekme miktarlarındaki farklılıklar parça şeklinde bozulmalara, malzemeler arasında çatlamalara neden olmaktadır. Bu nedenle çekme miktarlarının eşit olması veya en fazla %0.2 farklı olması durumunda hatasız olarak parça üretilebileceği ifade edilmiştir.

Zhang, Ong, Li, Pook, (2010) yaptıkları çalışmada iki katmanlı, gözenekliliğe meyilli seramik kompozit parçaların toz enjeksiyon kalıplamayla üretilebilirliğini araştırmışlardır. Seçilen iki seramik malzemeden AR7845 kaba taneli AR7820 küçük tanelidir. Bu iki malzeme farklı sinterleme davranışı göstermektedir. İnce taneli olan kaba taneli olanla karşılaştırıldığında, daha hızlı çekme yapmaktadır. Bu iki malzeme tozlarından dikdörtgen levhalar şekinden üretilen parçalarda eğilme veya bükülme meydana gelmiştir. Eğilme miktarı her bir katmandaki malzeme kalınlığıyla ilişkilidir. Ara yüzeylerde birleşmeyen kısma veya bölgesel çatlaklara rastlanmamıştır. Çift katmandan oluşan gözenekliliğe meyilli seramik kompozit malzeme üretimi farklı sıcaklıklarda sinterlemeyle başarılabildiği belirtilmiştir.

2.2. Farklı Malzemelerin Birleştirilmesinde Ara Katman Kullanımı

Aydın (2008) yaptığı çalışmada, gözenekli yapıdaki seramik ile paslanmaz çeliği, ara yüzeyde farklı ıslatma malzemeleri (Ag, Cu ve Ag-Cu-Ti alaşımı) yaklaşık 100 mikron kalınlıkta kullanılarak vakum-argon atmosferi içerisinde 0.2 ve 2 MPa basınç altında yük uygulanarak 850, 875, 900°C’de 45 dakika sürede birleştirmiştir. Seramik-metal birleşme arayüzeyleri tarama elektron mikroskobu (SEM) ve konsantrasyon değişimi için EDS analizleri yapılarak incelenmiştir. Seramik malzemenin gözenekli yapısı nedeniyle Ag, ve Ag-Cu-Ti alaşım ara tabaka malzemeleri gözeneklere dolmuş ve aratabaka kalınlıkları kaynaktan sonra yaklaşık 40-60 mikron kalınlıklara kadar incelmıştır. Çalışmada gözenekli seramik ile paslanmaz çelik malzemenin birleşme mekanizması tartışılmıştır. Ara yüzeyde seramik ile paslanmaz çeliğin birleşiminin, seramik tarafında infiltrasyon ve paslanmaz çelik tarafında ise difüzyonla gerçekleştiği belirtilmiştir.

Jadoon, Ralph, Hornsby (2004) yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan, metal alaşımı(demir-krom-alimünyum) ve seramik malzemelerin metalik ara katmanla birleştirilmesini araştırmışlardır. Çalışmada ara katman olarak farklı kalınlıklarda Cu folyo ve Ti/Cu/Ti folyolar kullanılmıştır. Alaşım elementleri ve bakır seramik tarafına infiltrasyon olduğu ve seramik malzemedeki silisyum ve azotun alaşım metaline difüzyon olduğu tespit edilmiştir. Ti/Cu/Ti ara katman kullanılarak birleştirilen malzemeler arasında gevrek ara yüzeyler oluşmasından dolayı birleştirme dayanımı azaldığı belirtilmektedir.

Sayyedain, Salimijazi, Toroghinejad, Karimzadeh (2014) Al_2O_3 (20-30nm) ve Al tozlarını 500 °C de ve 450 MPa basınçla sıcak presleyerek nonokompozit malzeme elde etmişlerdir. Daha sonra elde ettikleri iki numuneyi sıvı faz geçişi (SFG : transient liquid phase (TLP)) ile birleştirmişlerdir. Birleştirme işleminde iki numune arasında bakır katman kullanmışlardır. Çalışmada, birleştirme zamanının mikroyapıya ve kompozit malzemenin TLP difüzyon bağı dayanımı incelenmiştir. İşlem süresinin artmasıyla birleşme bölgesinde gevrek ötektik yapının azalması birleşme bölgesinin kesme dayanımının artmasına neden olmuştur. 580 °C de 60 dak birleşme zamanında ana malzemenin % 85’i kadar kesme dayanımı elde edildiği belirtilmiştir.

Chen, Feng, Wei, Xiong, Guo (2012) Cu-Zn alaşımı üzerine Ni kaplanmış ara katman kullanarak WC-Co ile 3Cr13 paslanmaz çeliğin lehimli birleştirilmesini araştırmışlardır.

Lehimleme zamanının ve sıcaklığının artmasıyla birleştirmenin dayanımı önce artmakta daha sonra ise düşmektedir. Ara katmana Ni eklenmesi difüzyon miktarını yükselttiği için birleştirilen malzemeler arasındaki bağ dayanımını artmaktadır. WC-Co/ara katman/3Cr13 malzemeler arasında uzun östenit yapı (uzun yuvarlak) oluşmuştur ve WC-Co tarafında daha fazla olduğu belirtilmektedir.

Zhang, Chandel, Seow (2002) alumina ve paslanmaz çeliği bakır ara katman kullanarak birleştirmişlerdir. Ara katman olarak kullanılan bakıra krom ekleyerek, krom miktarının ara yüzeyin mikroyapısına ve bağ dayanımına olan etkisini araştırmışlardır. Ara kesit SEM ve EDS analizleriyle incelenmiş ve 4 noktadan eğme testi yapılarak birleştirmenin dayanımı araştırılmıştır. Bakır ara katmana krom katkısı seramik malzemenin ıslatılabilirliğini arttırdığından bağ dayanımı da artmaktadır. Ara kesitte Cr_2O_3 fazının oluşmasıyla atmosferdeki oksijen Cr tarafından tutulduğu ve birleşme bölgesini oksitlenmeden koruyarak Cr eklentisinin bağ dayanımına katkı sağladığı belirtilmektedir.

Chen, Feng, Xiong, Guo (2013) WC-Co üzerine 0,5mm Ni presleyerek ve preslemeden elde ettikleri WC-Co ve WC-Co/Ni malzemeleri Cu-Zn alaşımı ara katman kullanarak 410 paslanmaz çelik ile birleştirmişlerdir. Elde edilen iki birleştirme karşılaştırılmıştır. Sıcaklık ve bekleme zamanı gibi birleştirme parametrelerinin bağ dayanımına etkileri araştırılmıştır. Ni katman birleştirme bölgesindeki kalıntı gerilmeleri azalttığı için bağ dayanımını arttırıldığı belirtilmiştir.

Bazı Malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan ara tabakalar ve ara bölgede elde edilen mukavemet değerleri farklı kaynaklardan elde edilerek Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Bazı Malzemelerin Birleştirilmesinde Kullanılan Ara Tabakalar ve Elde Edilen Mukavemet Değerleri

Birleştirilen malzemeler	Ara Katman (μm)	Şartlar	En yüksek dayanım	Kaynak
WC-Co/90MnCrV8	Ni/Cu 10/10	Vakum, 850 °C, 45 dk	620 MPa Kesme testi	(Barrena, Gomez, Matesanz 2010)
WC-Co/3Cr13	Ni/Cu-Zn/Ni 20/ /20	Vakum, 1100 °C, 10 dk	154 MPa Kesme testi	(Chen ve diğerleri 2012)
WC-Co/410ss	Ni, 500	Vakum, 950 °C, 80 dk	195MPa Çekme testi	Chen ve diğerleri 2013)
WC-Co/40Cr Steel	Ni, 50	Vakum, 750 °C, 13 dk	293 MPa Kesme testi	(Guo, Wang, Gao, Shi, Yuan, 2016)
WC-Co/35CrMo çelik	Ag-Cu-Zn-Mn-Ni Alaşımı , 120	770 °C, 0.5 dk Sert lehimleme	366 MPa Kesme testi	(Jiang, Chen, Wang, Li 2016)
WC-Co/ Ti6Al4V	Ag-Cu-Ti	Vakum, 850 °C, 60 dk	879 MPa Kesme testi	(Barrena, Gomez, Merino, Matesanz, 2008)
Al ₂ O ₃ -Al/ Al ₂ O ₃ -Al Komp. malzeme	Cu, 25	Vakum, 580 °C, 60 dk	120 MPa Kesme testi	(Sayyedain ve diğerleri 2014)
9Si ₃ N ₄ /Fekroalloy	Cu, 50	Vakum, 1100 °C, 30 dk	67,5 MPa Kesme testi	(Jadoon ve diğerleri 2004)
SiC/430ss	W/Ni 200/1000	Vakum, 850 °C	55 MPa çekme testi	(Zhong, Hinoki, Jung, Park, Kohyama 2010)
SiO ₂ /AISI 304	Ag-Cu-Ti	Vakum, 875 °C	9.9 MPa Kesme testi	(Aydın, 2008)
Ti51Ni49/ Ti51Ni49	Ni, 50	Argon, 970	190 MPa Kesme testi	(Kejanlı, 2009)
Al ₂ O ₃ /304ss	Ti, 100		24,5 MPa Kesme testi	(Kim ve Yoo, 1998)
Al ₂ O ₃ /1Cr18Ni9 Ti	Cu, 10		70 MPa Kesme testi	(Lee, 1996)
Si ₃ N ₄ /AISI 316ss	Invar, 40 Fe-Ni-C alaşımı		100 MPa Kesme testi	(Hao, 1995)

2.3. Tungsten Karbürün (WC) Sinterlenmesiyle İlgili Yapılan Çalışmalar

Pötschke, Säuberlich, Vornberger, Marktscheffel , (2018) katı hal sinterleme yapılan nano boyuttaki sert metalleri ve özelliklerini araştırmışlardır. Sert metallerin sıvı faz sinterlemesinin genel olarak 1350 °C de yapıldığını ancak nano boyuttaki WC tozlarının yüksek yüzey aktivitelerinden dolayı 1200 °C’den daha düşük sıcaklıkta yoğunlaşmanın sağlanabileceğini ifade etmektedirler. Farklı Co oranları ve tane büyümesi engelleyicisi

kullanarak yaptıkları çalışmada katı hal sinterlemeyle 1150 °C ve 1230 °C arasında tamamen yoğunlaşmanın sağlanabileceğini göstermişlerdir. Kobaltın, WC tozları arasında katman ve küçük havuzcuklar şeklinde homojen olarak dağıldığını ve böylece çatlak oluşumunu önlediğini görmüşlerdir. Katı hal sinterleme yapılırken Co tozlarının boyutlarına göre oluşan küçük havuzcukların büyüklüğü ve buna bağlı olarak sertlik ve kırılma tokluğunun da kontrol edilebileceğini belirtmektedirler. Yaptıkları çalışmada, ağırlıklı olarak nano boyutta mikroyapının oluşmasıyla 2000 HV'nin üzerinde sertlik elde etmişler ve 3-4 μm aralıklarla 1 μm civarında Co havuzcuklarının oluşmasıyla da kırılma tokluğunun iyileştiği belirtilmiştir.

Sun, Su, Yang, Ruan (2015), WC toz boyutunun sinterleme davranışına ve mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. Deneylerde sinterleme sonrası toz boyutlarının 2.01 μm 'dan 3.19 μm 'a, 3.16 μm 'dan 4.72'ye ve 4.37 μm 'dan 6.03 μm 'a çıktığını ve sinterlemede küçük boyutlu tozlarla üretilen WC-%8Co sementit karbürde yoğunlaşmanın ve tane büyümesinin büyük tozlarla üretilene göre daha önce meydana geldiği belirtilmektedir.

Wang, Webb, Bitler, (2015) WC-Co malzeme içerisindeki Co oranına ve WC tane boyutuna göre termal genleşme ve termal iletim özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada Co oranı %6 iken termal genleşme katsayısı $5.7 (10^{-6}/\text{K})$ 'dir. Co oranının %16'ya çıkmasıyla termal genleşme $6.8 (10^{-6}/\text{K})$ olmaktadır. 3-6 μm aralığındaki büyüklükte WC tozlarından üretilen numunede termal genleşme $5.5 - 7 (10^{-6}/\text{K})$ arasında ölçülmüştür. %10-15 Co olan numunenin termal iletim katsayısı 110-130 W/mK aralığında olduğu belirtilmiştir.

Hidnert (1937) %6-13 Co içeren tungsten karbürün 20-400 °C arasındaki termal genleşme davranışını incelemiştir. % 5,9 Co içeren tungsten karbürün termal genleşme katsayısı 20-60 °C arasında 4.4×10^{-6} iken 300-400 °C arasında $5,9 \times 10^{-6}$ olarak belirlenmiştir. %12,9-13,2 Co içeren tungsten karbürün termal genleşme katsayısı 20-60 C arasında $5,0 \times 10^{-6}$ iken 300-400 C arasında $6,7 \times 10^{-6}$ 'dır. 20-400 C arasında %13 Co içeren tungsten karbürün termal genleşme katsayısı %6 Co içeren içeren tungsten karbürün termal genleşme katsayısından %15 daha büyük olduğu belirtilmiştir.

Fayyaz, Muhamad, Sulong, Rajabi, ve Wong, (2014) WC–10Co–0,8VC malzemesinden mikro toz enjeksiyon kalıplama yöntemi ile elde edilen numunelerin, kalıplama ve sinterleme davranışlarını incelemişlerdir. Sinterleme sıcaklığının artması ile yoğunluk ve sertliğin arttığını tespit etmişlerdir. 1330°C'den 1410°C'ye kadar farklı değerlerde sinterlenmiş parçaların mukavemeti artmış daha yüksek sıcaklıklarda ise mukavemetin azaldığı belirlenmiştir.

Qu, Gao, Qin, Lei (2004) WC–5TiC–10Co tozlarından TEK ile parça üretimini incelemişlerdir. Çalışmalarında mum esaslı bağlayıcı kullanarak elde edilen besleme stokunun reolojik özellikleri araştırılmıştır. Sinterlemiş numunelerin mukavemetleri ve sertlikleri klasik toz presleme ile yapılan numunelere göre daha iyi olmuştur. Numunelerin boyutsal hassasiyetleri $\pm\%0.2$ olarak tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda TEK yöntemi sementit karbür için ideal bir üretim metodu olduğu belirtilmektedir.

Heng, Muhamad, Sulongn, Fayyaz, Amin, (2013), WC-10Co malzemeden mikro toz enjeksiyon kalıplama yöntemi ile parça üretmişlerdir. Üretilen parçalar 1380 °C, 1400 °C ve 1420 °C'de sinterlenmiş ve numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Sinterleme sıcaklığının artması ile numunelerin yoğunluğunun, sertliğinin, mukavemetinin ve tane boyutunun arttığı belirlenmiştir. Düşük sıcaklıkta sinterlenen numunelerde gözeneklerin fazla olduğu tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda sinterlenen numunelerde hacimsel çekme oranı %25 ile %31 arasında olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca kalıp sıcaklığının doluma etkisi belirlenmiştir. WC tozları içeren besleme stoğunun sıcaklık iletkenliğinin yüksek olmasından dolayı kalıp sıcaklığının boşlukların dolmasında daha fazla etkilişi olduğu tespit edilmiştir.

Fabijanić, Alar, Ćorić, (2015) nano boyuttaki WC-%9Co malzemeye Cr_3C_2 ve VC ekleyerek sinterleme davranışını araştırmışlardır. Sinterleme işlemi hidrojen ve sıcak izostatik preslemeyle (sinter-HIP) yapılmıştır. Sinterleme parametrelerinin ve tane büyümesini engellemek için ekledikleri malzemelerin (Cr_3C_2 ve VC) mikroyapı ve mekanik özelliklere etkileri incelenmiştir. Nano boyuttaki WC-Co tozlarının sinterlenmesinde tane büyümesi kolay bir şekilde meydana geldiği ve bunun için Cr_3C_2 ve VC eklendiğini belirtmektedirler. Hidrojen atmosferinde sinterleme yapıldığında sıcaklığının artması mikroyapıda düzensizliğe ve sertliğin düşmesine neden olmaktadır. Cr_3C_2 eklentisinin tane büyümesini engellediği ve bununla mikroyapının daha düzenli

olduğu, sertliğin ve kırılma tokluğunun arttığı tespit edilmiştir. % 0,45 Cr₃C₂ eklenmesiyle en iyi kırılma tokluğu elde edilmekle birlikte sertlik yaklaşık olarak 70 HV arttığı belirtilmiştir.

Erdoğan, Erol, Yönetken , (2013) WC ve Co'dan oluşan kompozit malzeme üretmişlerdir. Deneylerde 2 µm ve 10 µm tane boyutunda WC (%80) tozları ile 2 µm tane boyutunda Co (%20) kullanılmıştır. Malzemeler gerekli TM işlemlerinden geçirilerek silindirik kalıp içerisinde preslenerek 15 mm çapında ve 2-5 mm yüksekliğinde kapsül şeklinde numuneler üretilmiştir. Elde edilen numunelere %90N+%10H₂ atmosferinde 1200-1300-1400 °C sıcaklıklarda mikrodalga sinterleme yapılmıştır. 2 µm büyüklüğünde ki tozlardan elde edilen kompozit malzemenin yoğunluğu 13,82 g/cm³ iken 10 µm büyüklüğünde ki tozlardan yapılan malzemenin yoğunluğu 13,71 g/cm³ olarak bulunmuştur. Küçük tane boyutu ile üretilen kompozit malzemenin mekanik özellikleri arttırmıştır. 2 µm tozlardan 1300 °C'de sinterlenerek yapılan kompozit malzemenin sertlik değerleri 490 HB iken 10 µm tozlardan üretilenin 465 HB olduğu belirtilmiştir.

2.4. Tek Yöntemiyle Kesici Takım Üretimi

Sung, Yoon ve Ahn , (1999), P30 kalite (WC-Co-TiC-TaC) besleme stoku kullanarak TEK yöntemiyle WCMX 06T308 model kesici ucun üretimini araştırmışlardır. Sinterleme işlemi 1400 °C sıcaklıkta 1 saat süreyle vakum ortamında yapılmıştır. sinterleme sonunda %100 yoğunluğa ulaşılabildiğini, toz oranının ve enjeksiyon parametrelerinin kontrol edilerek %0.4 boyutsal toleransla kesici ucun TEK yöntemiyle üretilabildiğini belirtmektedirler. Çalışma sonucunda TEK yönteminin hem ekonomik olarak parça üretilen hem de daha faydalı bir kesici takım üretimi için, tasarım konusunda esnek bir yöntem olduğunu ifade etmektedirler.

Lin, Xu, Shan, Chung, Park, (2015) TEK yöntemiyle WC-%10Co besleme stokundan döküm kalıbı işleme için frezeleme takımı üretmişlerdir. Takım üretiminin ardından mikro yapı element kompozisyonu ve aşınma dayanımı araştırılmıştır. TEK yöntemi ile üretilen kesici takımda % 95 (14.21 g/cm³) teorik yoğunluğa ulaşılmış ve % 98 boyutsal tolerans yakalanmıştır. Döküm kalıbının işlenmesinde, üç saat süre sonunda 0.16 mm aşınma meydana gelmiştir. Çalışmada mekanik özellikleri iyi olan komple karbür frezeleme takımı başarı ile üretildiği belirtilmiştir.

Sommer, Kern ve Gadow (2013) ağaç esaslı malzemeler için seramik kesici uçların TEK ile üretimlerini araştırmışlardır. Çalışmada alüminadan üç farklı besleme stoku kullanarak enjeksiyon parametrelerinin kesici geometrisine etkilerini incelemişlerdir. Enjeksiyon hızı ve girişin ucun keskinliğinin üzerinde etkisinin olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonucunda TEK ile üretilmiş seramik takımların ahşap malzemeler için uygun olduğu tespit edilmiştir.

Cheng, Sun ve Hu (2014) mikrodalga sinterlemeyle yüksek mekanik özelliklere sahip Al_2O_3/TiC seramik takım üretimini ve sinterleme sıcaklığının yoğunluk, mekanik özelliklere mikroyapıya etkisini araştırmışlardır. 1600 °C sıcaklıkta 10 dakika mikrodalga sinterleme yapılarak %99 yoğunluğa ulaşılabilildiğini ve 1700 °C’de 10 dakika sinterleme süresiyle en iyi mekanik özellikler elde edildiğini belirtmektedirler.

Ko, Kim ve Yoon (2009) parmak frezelerin üretimini TEK ile incelemişlerdir. Çalışmalarında tungsten karbür tozlarını kullanarak bir parmak freze üretmişler ve parmak frezenin talaş kaldırma kabiliyetini normal takımlar ile kıyaslamışlardır. TEK ile üretilmiş takımlar klasik yöntemle göre daha hızlı üretildiği belirtilmiştir.

Heo, Kim, Chang ve Lee (2012) 0,5 mm çapında düz ve küresel uçlu iki tip kesiciyi zirkonyum malzemeden mikro toz enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretmişlerdir. Bu kesiciler, sert malzemelerden üretildikleri için aşınmaya karşı yüksek dayanıma sahip oldukları belirlenmiştir. Çalışmalarının sonunda kesici üretiminde toz enjeksiyon kalıplama yönteminin klasik takım imalatı ile karşılaştırıldığında daha etkin, ucuz ve hızlı bir yöntem olduğunu belirlemişlerdir.

2.5. İşlenebilirlik Çalışmaları

Sekmen, Günay ve Şeker (2015) AA 2011 ve AA 7075 alüminyum alaşımlarının işlenmesinde, kesme parametrelerinin (takım talaş açısı ve kesme hızı) yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerini, yığıntı talaş (YT) ve yığıntı katman (YK) oluşumunu incelemişlerdir. İşleme deneylerinde, kesici takıma hem pozitif hem de negatif yönde talaş açısı verilerek talaş kaldırılmasını sağlayan bir deney düzeneği kullanılmıştır. Her iki alaşım için ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerleri, talaş açısının büyük değerlerinde (15° ve 20°) düşük çıkarken, AA 7075 alaşımında özellikle talaş açısının küçük değerlerinde (0° ve -5°) oldukça yüksek çıkmıştır. Kesme deneylerinde kullanılan kaplamasız karbür kesici

takımlar, SEM ve EDS analizi ile incelendiğinde AA 7075 alaşımı işlenirken, AA 2011 alaşımına göre daha fazla YK ve YT oluşumu meydana geldiği belirtilmiştir.

Santos, Machado, Sales, Barrozo ve Ezugwu (2016) Al alaşımlarının işlenebilirliği konusunda derleme çalışması yapmışlardır. Al alaşımlarının işlenmesinde Si (% 7,5 üzeri), SiC, Al₂O₃ partiküllerinin işleme esnasında problemlere yol açtıklarını ve talaş kontrolünün ve boyutsal hassasiyetin yakalanmasının zorluğunu ve parçada çarpılma ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Delme işlemlerinde talaşın kesiciye yapıştığı ve helisel kanalları doldurduğu ve bu nedenle takım üzerinde oluşan torkun artarak takım hasarlarına neden olduğu ifade edilmiştir. Genel olarak karşılaşılan problemlerin azaltılabilmesi için HSS, N kalite sementit karbür ve sentetik elmas takımların seçilmesi ve uygun işleme koşullarının, yağlama ve soğutma sisteminin kullanımı tavsiye etmişlerdir.

Çaydaş ve Çelik (2017) yaptıkları çalışmada, Al 7075 – T6 alüminyum alaşımını K 20 kalitesindeki karbür takımlarla sürekli delme deneylerine tabi tutmuşlardır. Deneylerde kesme hızı (V) sabit tutulurken, ilerleme miktarı (f) ve matkap uç açısı (θ) parametreleri, belirli sınırlar içerisinde değiştirilmiş ve bu faktörlerin yüzey pürüzlülüğü, ilerleme kuvveti ve takım uç sıcaklığı üzerindeki etkileri deneysel olarak tespit edilmiştir. İlerleme hızının ve matkap uç açısının artmasıyla, eksenel ilerleme kuvvetinin ve ortalama yüzey pürüzlülüğünün arttığı bulunmuştur. İlerlemeye ve uç açısına bağlı olarak takım uç sıcaklığının azaldığı belirtilmektedir.

Hüseyinoğlu ve Tosun (2009) yaptıkları çalışmada 7075 alüminyum alaşımının minimum soğutma sıvısı kullanılarak frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğü üzerinde işleme parametrelerinin etkisini incelemişlerdir. Deneylerde ilerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı, fakat devir sayısı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığı tespit edilmiştir. Karbür takımlarla yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü TiN kaplı HSS ve kaplamasız HSS takımlara göre daha düşük olduğu belirtilmiştir.

2.6. Literatür Özeti ve Değerlendirme

TEK yöntemiyle farklı malzemelerden parça üretimi konusunda co-enjeksiyon yöntemiyle çalışmalar yapılmaktadır. Bu yöntemle farklı malzemelerden parça üretilirken, malzemelerin sinterleme esnasındaki çekme miktarlarına bağlı olarak iç ve dış kısımdaki

malzemeler arasında basınç oluşmakta ve oluşan basınç difüzyonu etkilemektedir. Difüzyon durumuna ve termal genleşme katsayısı farkına göre de malzemeler arasında boşluk, çatlak ve birleşmeyen bölgeler gibi hatalar ortaya çıkmaktadır. TEK ve toz metalürjisi (TM) yöntemleriyle daha büyük veya farklı özelliklere sahip parçalar üretebilmek için son çalışmalarda insört kullanıldığı görülmektedir. Literatürde, insört kullanılarak TEK yöntemiyle daha büyük parçalar üretilebileceği, sinterleme süresinin azaltılabileceği ve böylece üretim maliyetlerinin düşürülebileceği belirtilmektedir. TM yöntemiyle içte çelik insört dışta sermet malzeme kullanılarak parça üretimi konusunda yapılan çalışmada çelik ve sermet malzeme arasında birleşmenin sağlandığı ancak kalıntı gerilmelerin ortaya çıktığı belirtilmektedir.

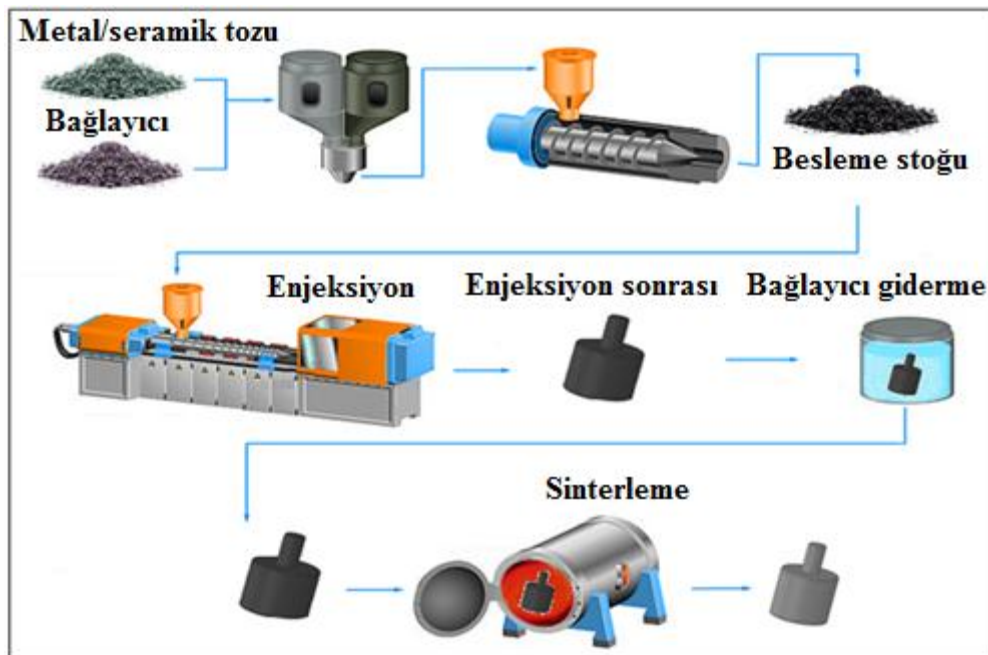
TEK yönteminin haricinde WC ve diğer teknik seramik malzemeler metal malzemelerle difüzyon kaynağı ve sert lehimleme gibi yöntemlerle birleştirilmeye çalışılmaktadır. Bu yöntemlerde metal ve seramik gibi termal genleşme katsayıları farklı olan malzemelerin birleştirilmesinde bahsedilen problemleri azaltmak için ara katman kullanılmaktadır. Ara katman olarak ergime sıcaklığı birleştirilen malzemeye yakın veya düşük ve kolay difüze olabilen metal malzemeler tercih edilmektedir. Fiziksel ve kimyasal özellikleri farklı olan malzemeler ara katman kullanılarak birleştirildiğinde aradaki bağ dayanımının arttığı belirtilmektedir.

Bu tez çalışmasında, halihazırda komple karbür çubuktan taşlanarak üretilen yekpare karbür T kanal çakısına alternatif olarak insörtlü toz enjeksiyon kalıplama yöntemiyle kompozit T kanal çakısı geliştirilmiştir. Literatür incelendiğinde toz enjeksiyon kalıplama yöntemiyle bütünüyle karbür malzemedan takım üretimi için çalışmalar yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmada ise literatürden farklı olarak İTEK yöntemiyle üretilen çakının sap kısmında çelik kullanıldığı için kompozit T kanal çakı üretiminde WC-Co malzeme kullanımı 29,2 kat ve taşlama işlemi % 87,42 azaltılmıştır. Ayrıca sap kısmının çelik olması takıma tokluk kazandırdığı için performans testlerinde orijinal yekpare T kanal çakıya göre İTEK T kanal çakıyla daha düşük kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülükleri elde edilmiştir.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Toz Enjeksiyon Kalıplama

Toz enjeksiyon kalıplama (TEK), toz haldeki malzemelerden parça üretilen bir yöntemdir. TEK yönteminde tozların kalıba enjekte edilebilmesi için termoplastik bağlayıcılar ve katkı maddeleri ile karıştırılması gereklidir. Hazırlanan toz-bağlayıcı sistemlerine besleme stoku adı verilir. Besleme stokları çok bileşenli sistemler olup, çok sayıda bağlayıcı benzer katkı maddeleri içermektedir. Kullanılan bağlayıcılar termoplastik karışımlardır ve içlerinde mumlar, polimerler, yağlar, yağlayıcılar ve yüzey aktif maddeler vardır. Bağlayıcı, akış özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla karışımın karmaşık kalıp geometrisini doldurmasını sağlar (Merchar, 1990). Besleme stoku içerisinde bağlayıcı toplam hacmin ortalama %35 - %50'sini oluşturur. En uygun toz/bağlayıcı oranı deneysel olarak belirlenmesinin ardından karıştırılarak granül haline getirilir. Granül haldeki karışım enjeksiyon makinesiyle, uygun basınç ve sıcaklıkta kalıp boşluğuna enjekte edilir. Daha sonra elde edilen parçanın içerisinde bağlayıcı ve katkı maddelerinin bir kısmı alınarak parça sinterlenir. Sinterlemede geriye kalan bağlayıcı giderilirken tozların birbirine difüzyonu sağlanarak parça üretimi gerçekleştirilmiş olur (Karataş ve Sarıtaş, 1998; Liu, Loh, Tor, Khor, 2003). TEK yönteminin aşamaları Şekil 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.1. TEK yönteminin aşamaları

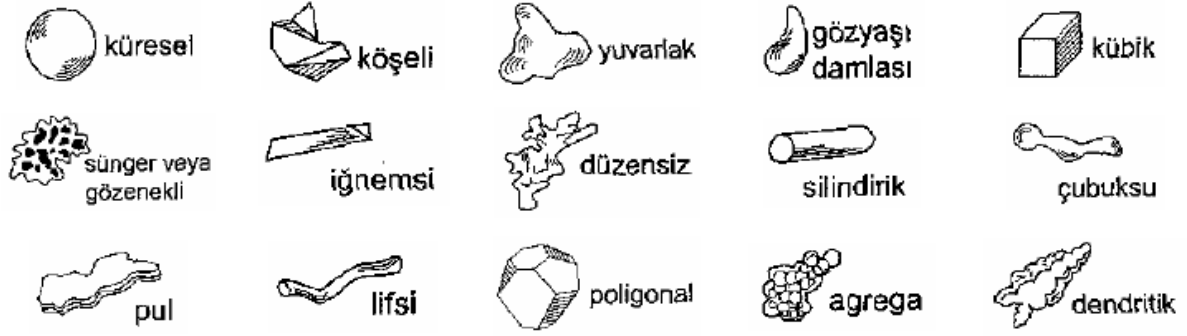
Bu yöntemle metal, seramik, alaşım ve intermetalik malzemelerden karmaşık şekilli parçaları hassas olarak üretmek mümkündür. Enjeksiyon kalıplamayla tek aşamada kalıplanan ve sinterlenen parçaların yoğunluğu, geleneksel yöntemlerle preslenerek sinterlenen parçalardan daha yüksektir. Mukavemetleri ise döküm ve haddeleme ile üretilenlere yakındır (Kryachek 2004). Diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında seri üretim kabiliyeti daha yüksektir ve işçilik diğer yöntemlere göre yaklaşık olarak 3 kat daha azdır.

TEK yöntemiyle üretilen parçalar net ölçülerde üretilebildiği için çok fazla talaşlı imalat gerektirmez (German 1998). TEK yöntemiyle üretim sonrası yapılması gereken talaşlı üretim yumuşak malzemeler için kolay olsa da tungsten, kompozitler, intermetalikler ve seramikler gibi sert malzemeler için ikincil işlem hem zordur hemde maliyetlidir. Bundan dolayı TEK yöntemiyle işlenmesi zor olan çok sert malzemelerden dahi parça üretimi diğer yöntemlere göre da avantajlıdır (Vervoort ve diğerleri 1996). Ayrıca toz-bağlayıcı karışımının (yolluk, dağıtıcı ve hasarlı ham parçalar da dâhil) geri dönüşümünün mümkün olması sayesinde malzeme israfı en aza iner. Bu durum, refrakter malzemeler, özel seramikler ve kıymetli metaller gibi pahalı hammaddelerle yapılan üretim için büyük önem taşımaktadır (German 1998).

TEK'in sağladığı bir diğer olanak, iki farklı malzemedan tabakalı bir yapı (ko-enjeksiyon) oluşturmayı mümkün kılmasıdır. Bu tür parçalar farklı iki malzemenin ham iken kalıplama işlemiyle birleştirilmesiyle oluşturulur. Bu seçenek sayesinde korozyon bariyerleri, aşınma yüzeyleri, elektrik bağlantıları ve iç kısmı yüksek tokluğa sahip dış kısmı sert parçalar üretilebilir (German 1998).

3.1.1. Toz enjeksiyon kalıplamada kullanılan tozlar

TEK yöntemiyle parça üretiminde toz boyutları ve şekli önemli bir etkindir. Toz özellikleri enjeksiyonu, sinterlemeyi ve üretilen parçanın yapısal ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bu yüzden sinterleme işleminin ve üretilecek olan parçanın özelliklerinin kontrol edilmesi için tozun başlangıç özelliklerinin iyi bilinmesi gereklidir (German 1991; Sarıtaş, Türker ve Durlu 2007). Toz metalurjisi yönteminde kullanılan tozlar Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Toz metalurjisinde kullanılan toz şekilleri (Saritaş ve diğerleri 2007)

TEK’te kullanılan tozlar geleneksel toz metalürjisinde kullanılanlara nazaran boyutları daha küçüktür. Kullanılan tozların parçacık boyutu genellikle 20 μm ’dan küçüktür. Metal tozları ortalama 5–10 μm , seramik veya sert metal tozları ise ortalama 1–2 μm ’dur. Bu şekilde ince taneli tozların kullanılması, tozların besleme stoku içerisinde homojen dağılmasına ve enjeksiyon esnasında kalıp boşluğunun homojen bir şekilde doldurulabilmesi için gerekli olan doğru akış ve viskozite kombinasyonunun elde edilmesine katkı sağlamaktadır. Oluşturulacak olan besleme stoğuna tozların yüksek hacimde yüklenmesiyle (metaller için yaklaşık olarak hacimce %60, seramikler için ise hacimce %55), uygun bir akış sağlanması kaydıyla bağlayıcı giderme oranını minimize edilebilmektedir. Bununla birlikte büzülme (çekme) daha az gerçekleşeceği için boyutsal kontrol de daha kolay sağlanabilmektedir (Vervoort1 996). TEK için ideal bir tozun özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. TEK için ideal toz özellikleri (Vervoort 1996)

Tane boyutu	0,1 ila 20 μm arası olmalı
Ortalama tane boyutu	2 ila 8 μm arası olmalı
Vurgu yoğunluğu	En az teorik yoğunluğun %50'si
Tane şekli	Küresele yakın olmalı
Şev açısı	45°'nin üzerinde olmalı
Sıkıştırılmış şev açısı	55°'nin üzerinde olmalı
Yoğun, gözenek içermeyen parçacıklar	
Temiz parçacık yüzeyi	

3.1.2. Toz enjeksiyon kalıplamada kullanılan bağlayıcılar

TEK yönteminde toza akışkanlık özelliği kazandırarak toz malzemenin kalıp içerisine aktarılması sağlayan bağlayıcıdır. Aynı zamanda kalıp içerisinde katılaşıp sinterlemeye

kadar tozların bir arada tutulmasını sağlamaktadır. Tüm bağlayıcılar üç ana grupta toplanabilir. Bunlar parafin ve yağ esaslı bağlayıcılar, su esaslı bağlayıcılar ve katı polimerik eriyiklerdir (Urtekin 2008; Uprak 2008). Çizelge 3.2’de çeşitli bağlayıcı ve katkıları verilmiştir.

Çizelge 3.2. Tipik bağlayıcı örnekleri (German 1990)

Bağlayıcı 1	%70 parafin mum, %20 mikrokristal mum, %10 metil etil keton
Bağlayıcı 2	%67 polipropilen, %22 mikrokristal mum, %11 stearik asit
Bağlayıcı 3	%33 parafin mum, %33 polietilen, %33 balmumu, %1 stearik asit
Bağlayıcı 4	%69 parafin mum, %20 polipropilen, %10 carnauba mum
Bağlayıcı 5	%45 polistiren, %45 nebati yağ, %5 polietilen, %5 stearik asit
Bağlayıcı 6	Bağlayıcı 6 : %25 polipropilen, %75 fıstık yağı
Bağlayıcı 7	Bağlayıcı 7 : %65 epoksi reçine, %25 parafin mum, %10 bütüls-tearat
Bağlayıcı 8	%4 hint tutkalı, %3 gliserin, %94 su

Bağlayıcılar küçük miktarlarda iyi karışabilmeli, metal kalıptan kolay ayrılabilirmeli, şekillendirilen parçanın şeklini ve dayanımını koruyabilmeli, parçadan hızlı bir şekilde giderilebilmeli ve parçayı kalıntı karbon veya diğer bozunmuş artıklarla kirletmemelidir. Diğer bir ifadeyle, kalıplama sonrasında parça bütünlüğüne zarar vermeden ve ürünün final özellikleri üzerine olumsuz bir etkisi olmadan giderilebilmelidir (Vervoort 1996).

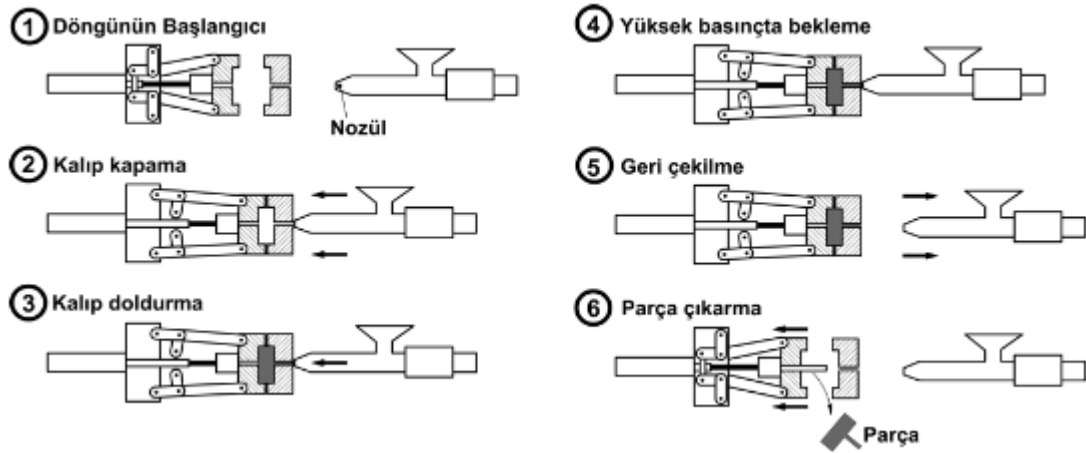
Bağlayıcı, tozların dağılımını, şekillendirmeyi, parçanın boyutunu ve sinterleme davranışını etkilemektedir. Bağlayıcı ve tozlar arasında reaksiyon oluşmamalıdır. Bağlayıcının çok düşük viskozitesi, toz bağlayıcı ayrışmasına sebep olurken, çok yüksek viskozite de karıştırma ve enjeksiyon işlemlerinde bazı sorunlara neden olabilmektedir. Bağlayıcı giderme aşamasında, parça içerisindeki bağlayıcı hiç bir kusur oluşmadan hızlı bir şekilde giderilebilmelidir. Bunun için bağlayıcı giderme işlemi iki aşamada gerçekleştirilir. Birinci aşamada bağlayıcının bir kısmı parçadan alınarak parçada küçük gözeneklerin meydana gelmesini sağlanır. İkinci aşamada bağlayıcının kalan kısmı ısı yolla tamamen giderilirken tozların birbirine yapışmasıyla parça şekli korunmuş olur. Bu aşamaların gerçekleşebilmesi için bağlayıcıya çeşitli katkıları eklenmektedir (Heaney 2012; German 1997; Karataş ve Sarıtaş 1998).

3.1.3. Toz enjeksiyon kalıplamada reoloji

Reoloji; toz teknolojilerinde kullanılan polimerler ve besleme stoklarının mukavemet, elastik, plastik ve viskoz akışlarını inceleyen bilim dalıdır (Sarıtaş ve diğerleri 2007). TEK işleminde de besleme stokunun kalıp boşluğuna akışı viskoziteyle ilişkilidir. Kalıplama yapılırken yüksek viskozite nedeniyle akış zorlaşır çok düşük viskozite ise toz-bağlayıcı hatalarının ortaya çıkmasına neden olur. TEK yönteminde diğer bir özellik ise elastikiyettir ve Hooke kanunu ile ifade edilmektedir. TEK yönteminde toz bağlayıcı karışımının viskozite ile elastikiyet karakteristikleri beraber incelemekte ve buna visko-elastisite denilmektedir. Bu karakteristik kalıplama sonrası soğuma sırasında boyut hassasiyeti, çekme payı, kalıptan numunenin sağlam ayrılması ve kalıntı gerilme oluşumuyla yakından ilgilidir (Karataş 1997). Toz bağlayıcı karışım viskozitesini etkileyen diğer bir parametre toz karakteristiğidir (toz boyutu, boyut dağılımı ve toz şekli) (Edirinsinghe ve Evans 1986). Viskozite enjeksiyon işlemi öncesinde deneysel olarak ölçülerek en uygun şartlar belirlenmelidir. Viskozite çeşitli tekniklerle ölçülebilir. En yaygın ölçüm ergime akış indeksi (EAI) olup, polimerin silindirik bir hazneden belirli basınç altında 10 dakikada akan kütlesi olarak ifade edilmektedir. Ancak bazı besleme stokları Newton tipi akış davranışı göstermez, dolayısıyla akışı tanımlamak için basit bir indeks yetersizdir. Bu nedenle besleme stoğunun viskozitesi ölçülürken kullanılan şartlar enjeksiyon kalıplamayı kısmen yansıtmalıdır. TEK’te kullanılan reoloji denemeleri genellikle kılcal reometre ve torkreometre ile gerçekleştirilmektedir. Ancak uygulamada viskozite ve kayma hızıyla çok iyi uyum sağladığı için TEK besleme stoğunun reolojik karakterini tayin etmede daha çok kılcal reometre kullanılmaktadır (Urtekin 2008).

3.1.4. Kalıplama

TEK, yönteminin kalıplama safhasında besleme stoğu, yeterli bir sıcaklığa kadar ısıtılarak bağlayıcı ergimiş hale getirilmekte ve basınçla kalıp boşluğuna doldurulmaktadır. Amaç, boşluksuz, hatasız, tozun homojen dağıldığı şeklin sağlanmasıdır. Bu nedenle ergimiş madde asgari zorlanma ile kalıbın içine akacak kadar yeterli derecede viskoziteye sahip olmalıdır. Aynı zamanda parça en düşük maliyette en kısa sürede üretilmelidir (Karataş ve Sarıtaş 1998). Şekil 3.3’te TEK yönteminin kalıplama aşaması görülmektedir.



Şekil 3.3. Kalıplamada işlem basamakları (German 1997)

Toz ve plastiklerin enjeksiyon kalıplamaları hemen hemen aynı prensibe dayanmaktadır. Aynı enjeksiyon makinesi toz ve plastikler için kullanılır. Bu arada bazı farklılıklar da dikkate alınmalıdır. TEK'de kullanılan besleme stokları sert malzemelerin tozlarını içermektedir, dolayısıyla TEK için enjeksiyon makinesinin vida ve enjeksiyon ünitesi aşınmaya karşı daha sert malzemelerden üretilmesi gerekmektedir. Bir diğer fark besleme stoğunun reoloji özelliklerinden kaynaklanır. Besleme stoğu, kayma hızına daha fazla bağlıdır, dolayısıyla TEK' de vida geometrisi plastiklerdekinden farklı olmaktadır. TEK için tasarlanan vidalar da sıkıştırma oranı plastiklere göre daha az olmaktadır. Plastikler için sıkıştırma oranı 2,3 ile 3 arası olurken, TEK için bu değer 1,7 ile 2,2 arasındadır. Kalıplamanın en önemli parametreleri: kalıp ve malzeme sıcaklığı, enjeksiyon basıncı ve hızı, ütülemeye geçiş zamanı, ütüleme basıncı ve süresi ve soğuma süresidir. Enjeksiyon sıcaklığı bağlayıcıda bulunan polimerin ergime sıcaklığından genelde 10 ile 20 °C yüksek olmaktadır. Enjeksiyon sıcaklığının az olması besleme stoğunda düşük akışkanlığa ve parçada yüzey çizgilerine sebep olabilir. Enjeksiyon sıcaklığının yüksek olması toz ve bağlayıcının ayrılması gibi bazı sorunlara neden olabilir. Kalıp sıcaklığının az olması kalıp boşluklarının tam dolmamasına, yüksek olması ise çapağın oluşmasına sebep olabilir. Genelde mum içeren besleme stoklarının enjeksiyon sıcaklığı 150 ile 190 °C ve kalıp sıcaklığı 25 ile 55 °C aralığında olurken, katalitik besleme stokları için enjeksiyon sıcaklığı 200 ile 260 °C ve kalıp sıcaklığı 100 ile 150 °C aralığında olmaktadır (Heaney 2012).

TEK'de enjeksiyon hızı plastiklere göre daha fazla olmaktadır, bunun nedeni besleme stoğunun yüksek ısı iletkenliğe sahip olmasıdır. Enjeksiyon hızının az olması kalıp

boşluğunun dolmaması ve parçada yüzey kusurlarına, hızın yüksek olması toz ve bağlayıcının ayrışması gibi kusura sebep olmaktadır (German 1997; Safarian ve Karataş 2014).

3.1.5. Bağlayıcının giderilmesi

Bağlayıcı giderme, kalıplamadan sonraki en önemli aşamadır. Bu işlemde herhangi bir hatanın yapılması kalıplanmış parçanın sinterleme öncesi bozulmasına sebep olacaktır. Parçaya hasar verilmeden bağlayıcının çıkarılması çok hassas bir işlemdir ve birkaç aşamada yapılmalıdır (Gülsoy 2004; Urtekin 2008; Berber 2005). Bağlayıcının numuneden çıkarılması için ısıtma, kimyasal çözücülerde çözme, besleme stoğunda kullanılan tozlardan daha küçük tane boyutlu tozlar içine gömerek ısıtma (kılcal çekim ile bağlayıcı giderme), fitilleme ve suda çözme gibi işlemler tek başına veya ardışık olarak uygulanabilmektedir (Çizelge 3.3) (Oğulcu 2006 ; Turan 2010).

Çizelge 3.3. Bağlayıcı giderme yöntemleri (Vervoort 1996)

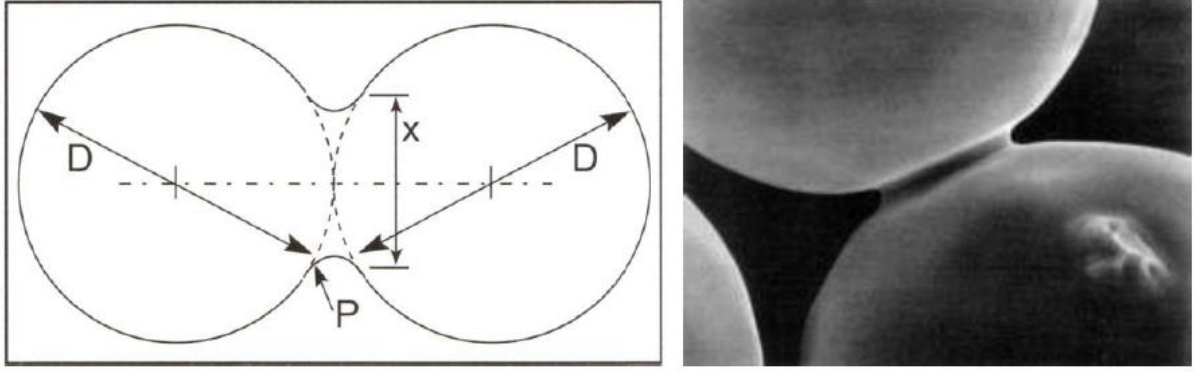
Yöntem	Yöntemin farklı uygulama şekilleri
Termal bağlayıcı giderme	a) Oksitleyici/redükleyici/inert atmosferle bağlayıcı giderme
	b) Vakum/normal basınç altında bağlayıcı giderme
	c) Ağırlık kaybı kontrollü ısıtma
Fitilleme ile bağlayıcı giderme	
Solventle bağlayıcı giderme	a) Solvent içine daldırma
	b) Yoğunlaştırılmış buhar akışı ile
Katalitik bağlayıcı giderme	a) Nitrik asit ile
	b) Oksalik asit ile

Bağlayıcı giderme işleminde çözücü ile bağlayıcı arasındaki reaksiyon parçanın dışından iç bölgesine doğru gerçekleşir. Bağlayıcı giderme süresi parça büyüklüğü ve diğer parametrelere bağlıdır. Parçanın kalınlığı artarken bağlayıcı giderme zamanı daha fazla artar. Genelde parça kalınlığı 10 mm üzerinde olması tavsiye edilmez. Bağlayıcının birinci elemanı ayrıldıktan sonra parçanın mukavemeti sadece bağlayıcının diğer elemanları ve tozlar arasındaki mekanik kilitlenmeye bağlıdır, çünkü bu aşamada tozların arasında hiçbir

birleşme meydana gelmemiştir. Birinci elemanın ayrılmasından sonra parça içinde meydana gelen gözenekler ikinci elemanın ayrılmasını kolaylaştırır ve böylece parçada kusur olmadan ikinci elemanda parçadan ayrılır. İkinci eleman ısıl ortamda çok yavaş ısıtma ile ayrılır. Isıl ortamda bekleme aşamaları bağlayıcının diğer elemanlarının sayısına bağlıdır. Bekleme sıcaklığının miktarı ve süresini tespit etmek için besleme stoğunun üzerine termo-gravimetrik (TGA) analiz yapılmaktadır. Sıcaklık, bağlayıcının içinde bulunan elemanlara ve bekleme süresi, elemanların miktarı ve parçanın et kalınlığına bağlıdır. Isıl bağlayıcı gidermenin ardından tozlar arasında birleşme başlar. Seramik parçalarda tozların boyutu metallere göre daha küçüktür, dolayısıyla bağlayıcı giderme işleminden sonra meydana gelen gözenekler küçük olur ve bağlayıcı uzaklaştırma işlemi daha uzun sürer (Heaney 2012).

3.1.6. Sinterleme

Sinterleme, TM veya TEK yönteminde parçayı oluşturan tozlar arasında yayılım ve benzeri atom hareketleri ile bağ oluşturarak mukavemeti artıran bir ısıl işlemdir. Sinterlemede atomlar bağlarını kopararak farklı yerlere hareket ederler. Atomların hareket edebilmesi için belirli bir enerji gereklidir ve bu enerjiye *aktivasyon enerjisi* adı verilir. Aktivasyon enerjisi malzemeye ve atomlar arası bağ kuvvetine bağlıdır. Bu nedenle sinterleme sıcaklıkları malzemelerin ergime sıcaklıklarına göre belirlenir (Saritaş ve diğerleri 2007). Yüksek sıcaklığa maruz kalan parçacıklar farklı taşınım mekanizmalarıyla birbirlerine bağlanırlar. Bu bağlanma boyun oluşumu olarak isimlendirilir (Şekil 3.4). İlerleyen sinterleme zamanında boyun büyür ve sinterleme sonrasında parçacıkları bir arada tutabilecek rijit bir yapı meydana getirir. Sinterleme esnasında parçacıklar arasındaki atomsal taşınım temel olarak difüzyon mekanizmaları ile gerçekleşmektedir. Sinterlenecek malzeme tek bir çeşit metalden veya seramikten oluşuyorsa buna tek bileşenli sistem veya birden fazla malzemeden oluşuyorsa buna da çok bileşenli sistem adları verilir (Yücel 2007) Sinterleme sıcaklığı, tek bileşenli sistemlerde metalin ergime sıcaklığının $2/3$ 'ü veya $4/5$ 'i kadar alınır. Çok bileşimli sistemlerde ise ergime derecesi düşük olan metalin ergime sıcaklığının altında tespit edilir. Sinterleme sıcaklığı ergime noktasına yaklaştıkça, hareket eden atomların sayısı arttığından sinterleme hızı artar. Sıcaklığa ve diğer parametrelere bağlı olarak sinterleme süresi 10 dakikadan birkaç saate kadar çıkabilmektedir (Eksi ve Yüzbasıoğlu, 2005).



Şekil 3.4. Sinterleme aşamasında tozlar arasında boyun oluşumu

TEK yöntemindeki sinterleme de geleneksel TM parçalarında uygulanana benzer şekildedir. Dikkat edilmesi gereken nokta metal tozlarının kullanılması durumunda bunların oksitten korunmasıdır. Bu yüzden işlem indirgeyici ortamlarda yapılır. Metalin korunması dışında söz konusu atmosferler, toz parçalarının yüzeyinde bulunan herhangi bir oksidi de indirgeme avantajına sahiptir. Kesin sinterleme ortamı tozun türüne bağlıdır. Birçok metal için hidrojen içeren atmosfer koşulları uygun olduğu halde çelik tozlarının sinterlenmesi durumunda atmosferde bir karbon bileşiğinin veya çelikte denge halindeki bileşiklerin bulunması gerekir (Gülsoy 2004; Uprak 2008).

Sinterleme TM ve TEK yöntemlerinin en karmaşık konusu olmasının yanı sıra ham parçayı, performansı yüksek bir ürüne dönüştürmesi yönüyle en önemli aşamadır. Sinterleme sırasında polimerin yakılması, parçacıklar arası bağlanma, boyut değişimi ve mikroyapının önemli miktarda irilesmesi gibi birçok olay gerçekleşir (Carter ve Norton 2007)

Sinterleme işlemleri katı-hal sinterleme ve sıvı fazlı sinterleme olmak üzere iki farklı yöntemle yapılabilmektedir. Sinterlenen parçanın belirli özelliklerde olmasının yanında parçanın istenilen boyutlarda olması da bir konudur. Katı hal sinterleme teorik açıdan en iyi anlaşılmasına rağmen sinterlenmiş ürünlerin %70'isi sıvı fazlı sinterleme ile üretilmektedir (Sarıtaş ve diğerleri 2007).

3.2. Difüzyon

Difüzyon, (yayınım) bir malzeme içinde atomların hareketidir. Atomlar, konsantrasyon farkını yok etmek ve homojen bir kompozisyon oluşturmak için düzgün bir şekilde hareket

ederler (Askeland 1993). Difüzyon olayı maddenin katı, sıvı ve gaz hallerinde gerçekleşmekle birlikte gaz haldeki bir maddede görülen yayılım katı haldekine göre çok daha fazladır. Katılarda özellikle metal malzemelerde görülen difüzyon olayı malzemeyi ısıtarak, gerilim (voltaj) veya dış kuvvetler uygulamakla gerçekleştirilir. Difüzyon olayını genel olarak sıcaklık, konsantrasyon, kristal yapı, alaşım elementleri ve tane boyutu etkilemektedir (Askeland 1993; Kurt 1996).

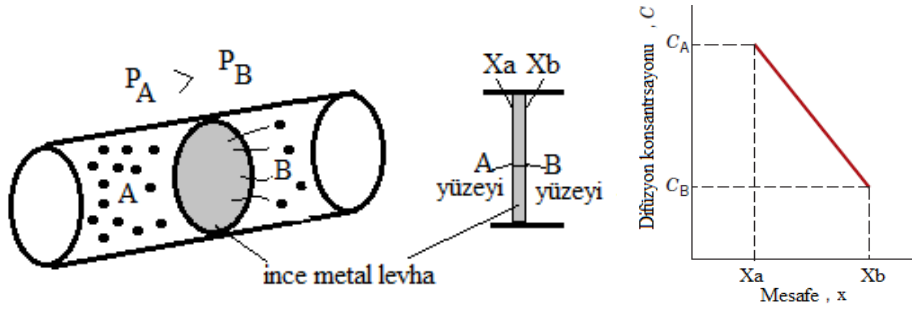
Difüzyon, malzeme özelliklerini geliştirmek veya malzemelere uygulanan bazı işlemlerin yapılabilmesi için önemli bir olaydır. Metallerin ısıtılması, malzemelerin kaplanması, seramiklerin üretimi, malzemelerin katılaşması, transistör üretimi, güneş pilleri ve hatta seramik malzemelerin çoğunun elektrik iletkenliği için difüzyona ihtiyaç vardır. Hatta farklı malzemelerin birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan yöntem difüzyon kaynağıdır. Difüzyon olayını istenilen şekilde kontrol altında tutarak malzemelere uygulanan işlemlerden daha iyi sonuç alınabilir.

3.2.1. Kararlı hal difüzyonu

Difüzyon zamana bağlı olarak gerçekleşen bir işlemdir. Bazı durumlarda difüzyonun zamanla nasıl değiştiğinin bilinmesi gerekebilir. Bu nedenle difüzyon akısı olarak adlandırılan (J), birim zamanda (t) birim düzlem alanı(A) boyunca geçen atom miktarı(M) hesaplanır. Difüzyon akısı Eş. 3.1 ile ifade edilir.

$$J = \frac{M}{A \cdot t} \text{ (kg/m}^2\text{s) veya (atom/ m}^2\text{s)} \quad (3.1)$$

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi yoğun olan A bölgesinden daha az yoğunluğa sahip B bölgesine doğru ince metal levha içerisinde difüzyon gerçekleşirken A yüzeyinden B yüzeyine doğru difüzyon yoğunluğu azalır. İki yüzey arasında kalınlık doğrultusu boyunca difüzyon yoğunluğu durumuna konsantrasyon profili adı verilir. A yüzeyi ile B yüzeyi arasında ölçülen konsantrasyon profili grafiğe dönüştürüldüğünde Şekil 3.5’deki gibi lineere yakın bir eğri elde edilir.



Şekil 3.5. Kararlı Hal Difüzyonu

Bu eğriyi lineer olarak kabul edersek eğimini Eş. 3.2'deki gibi yazılabilir.

$$\frac{C_A - C_B}{X_a - X_b} = \frac{\Delta c}{\Delta x} = \frac{dc}{dx} \quad (3.2)$$

Difüzyon sisteminde malzeme ile difüzyon olan element arasında belirli bir difüzyon katsayısı vardır ve bu değer D ile belirtilir. Difüzyon akısı (J) difüzyon katsayısı (D) ile ilişkilidir. Bu durumda sabit sıcaklıkta her hangi bir mesafedeki düzlemde, difüzyon olan elementin difüzyon akısı Eş. 3.3'ten hesaplanabilir.

$$J = -D \frac{dc}{dx} \quad (3.3)$$

D 'nin negatif işaretli olması difüzyon yönünün yüksek yoğunluklu bölgeden düşük yoğunluklu bölgeye doğru olduğunu göstermektedir. Bu denklem 1. Fick denklemi olarak bilinmektedir. Kararlı hal difüzyonu, sabit sıcaklıkta her hangi bir mesafedeki düzlemde difüzyon yoğunluğunun zamanla değişmediği bir durumdur (Callister 2007)

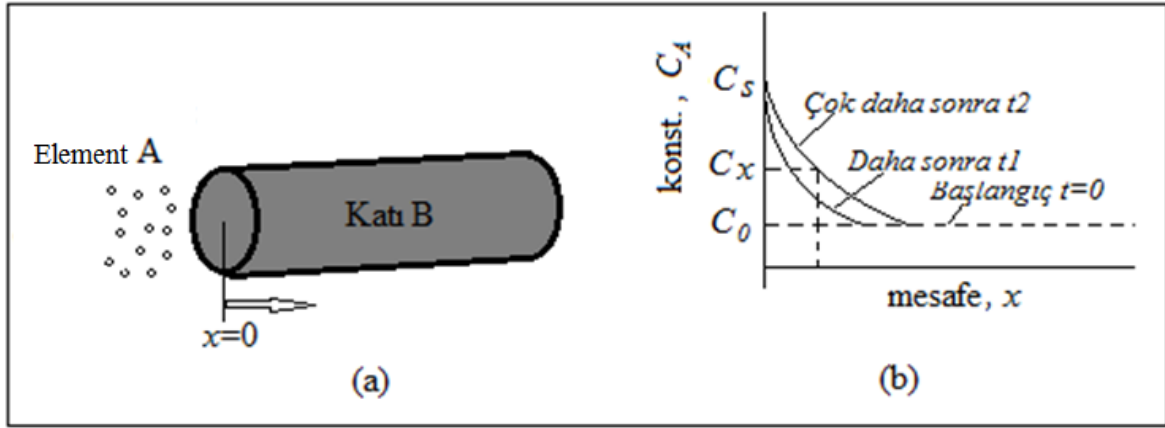
3.2.2. Kararsız hal difüzyonu

Koşulların zamanla değişmediği kararlı durum yayılımı mühendislik malzemelerinde yaygın değildir. Çoğunlukla malzemenin herhangi bir noktasında, çözünen atomlarının yoğunluğunun zamanla değişmesi, kararsız hal yayılımı olarak ifade edilir. Örneğin, çelik bir milin yüzeyinden içeriye sertleştirmek amacıyla karbon yayınıyorsa, yüzeyin altındaki karbonun yoğunluğu yayılım süreci ilerledikçe değişecektir. Bu durumda yayılımın zamandan bağımsız olduğu, kararsız hal difüzyonu için aşağıda verilen Fick'in ikinci denklemi geçerli olacaktır.

$$\frac{dC_x}{dt} = \frac{d}{dx} = \left(\frac{dC_x}{dx} \right) \quad (3.4)$$

Bu denkleme göre, bileşimdeki değişme hızı, yayınımla, yoğunluk eğimcesinin değişme hızının çarpımına eşittir. Bir elementin katıda yayınmasıyla ilgili bazı yayılım problemlerinin çözümünde bu eşitlik kullanılmaktadır.

Şekil 3.6'da gösterilen A elementinin B katısı içine yayınması durumunu ele alalım. Şekil 3.6b'de t_1 , ve t_2 zamanları için verilen eğrilerde görüldüğü gibi, yayılım süresi uzadıkça, x yönünde herhangi bir noktadaki çözünen atomlarının yoğunluğu artacaktır.



Şekil 3.6. Kararsız hal difüzyonu a) bir elementin katıda difüzyonu, b) katı yüzeyinden x mesafeye olan difüzyon yoğunluğu

Eğer A elementinin B katısı içindeki yayınlılığı bulunduğu yere bağlı değilse, Eşitlik 3.5'te verilen Fick'in ikinci denklemi şöyle olacaktır:

$$\frac{C_y - C_x}{C_y - C_0} = \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (3.5)$$

Burada

C_y : elementin yüzeydeki yoğunluğu

C_0 : elementin katıdaki başlangıç tek biçimli (üniform) dağılımı

C_x : t zamanında, yüzeyden x uzaklıkta elementin yoğunluğu

x : yüzeyden uzaklık

D : yayılan çözünen elementinin difüzyon katsayısı

t : zamandır.

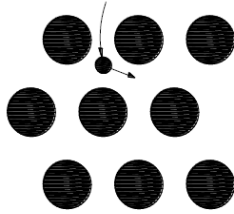
Hata fonksiyonu erf, belirli bir tanım verilmiş matematiksel bir fonksiyondur, Fick'in ikinci yasasının bazı çözümlerinde kullanılmaktadır. Hata fonksiyonu sinüs, kosinüsler gibi standart Çizelgelarda bulunabilmektedir veya bazı kitaplarda nasıl hesaplandığı anlatılmıştır.

Çeliklerdeki karbürizasyon ile yüzey sertleştirme gibi sanayideki üretim süreçlerinin çoğu kararsız hal yayınımla ilgilidir (Callister 2007; Savaşkan 1999)

3.2.3. Difüzyon mekanizmaları

Ara yer difüzyonu

Esas malzemenin kristal kafes sistemi içerisinde bulunan atomlarının arasına daha küçük atomların yayınımlı olarak tarif edilebilir (Şekil 3.7). Difüzyon mekanizmasını sağlayan etkiye bağlı olarak atom hareketlerinin kafes sistemi içerisinde göç şeklinde gerçekleştiğini söyleyebiliriz. Çelik malzemelerin sertleştirilmesini sağlayan Fe atomları arasına yerleşen daha küçük yarı çaplı C atomları bu mekanizmaya örnek verilebilir.

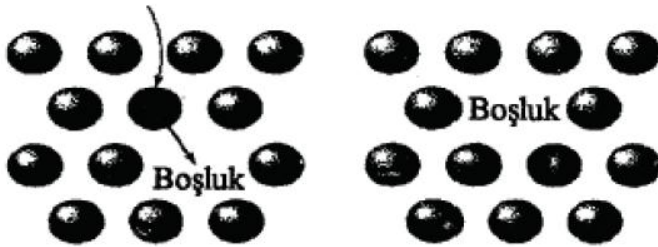


Şekil 3.7. Ara yer difüzyonu

Bu mekanizmada difüzyon olayı için kafes sistemi içerisinde atomik boşlukların olmasına gerek yoktur. Küçük çaplı atoma sahip olan elementler daha kolay yayınmaktadır. Örneğin B, C, H, N, gibi atom yarıçapı küçük elementler Fe, Cr, Ni, Mn, W, Ti gibi geçiş elementleri içerisine ara yer difüzyon mekanizmasıyla yayınabilirler (Askeland 1993). Bir arayer atomu boşluklarla kuşatılmış olup, ısı enerjisinin deformasyon enerjisi engelini aşması ile başka bir ara yere atlar (Buytoz, 1999).

Boşluk difüzyonu

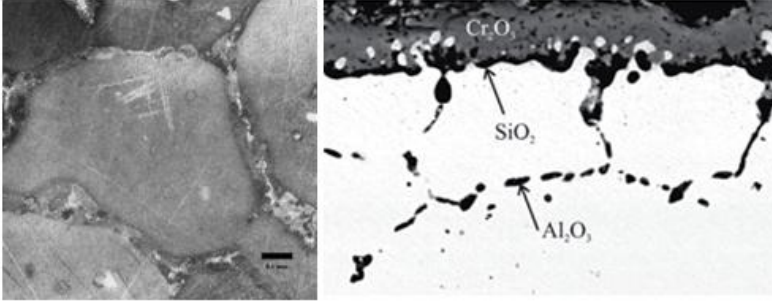
Bu difüzyon mekanizmasında kafes içerisinde mevcut bir boşluğun olması gerekir. Bu yüzden boşluk difüzyonunun oluşması arayer difüzyonuna göre daha zordur. Arayer difüzyonunda yeterli enerjiye sahip olduğunda atom difüze olabilir. Boşluk difüzyonu mekanizmasında, boş yerler yardımı ile yer değiştirme çok küçük bir aktivasyon enerjisini gerektirir. Artan sıcaklıkla birlikte atomların titreşim ve boş yer yoğunluğu artar, dolayısıyla yayınma kolaylaşır (Güleç ve Aran 1993). Normal olarak bir boşluğa yerleşen atomun hareketi bitişik komşu atomlar tarafından sınırlandırılmıştır ve atom başka kafes noktasına geçemez. Bununla birlikte komşu nokta boşsa Şekil 3.8’de görüldüğü gibi (koyu) atom bu boşluğa atlayabilir. Atlamanın meydana gelebilmesi koyu renkli atomun komşu atomların arasından geçmesini sağlayacak yeterli titreşim enerjisini elde etme ihtimaline bağlıdır. Bir atomun katı içerisinde göç edebilme oranı boşluk konsantrasyonuna bağlıdır. Boşluğa sıçrama ihtimali ve boşluk konsantrasyonu sıcaklıkla yakından ilişkilidir (Kurt, 1996; Buytoz, 1999). Boşluğun yanındaki atomun yerinden ayrılabilmesi için aşması gereken aktivasyon enerjisi engelini yenecek temel enerjiye sahip olması şartıyla bir sıçrama yapabilir.



Şekil 3.8. Boşluk difüzyonu

Tane sınırı difüzyonu

Çok kristalli malzemeler birçok taneciklerden meydana gelmektedir. Taneler arasında da boşluklu bir yapı mevcuttur. Tane sınırları arasındaki boşluklara doğru gerçekleşen atomsal yayılım tane sınırı difüzyonu olarak adlandırılır (Şekil 3.9). Bu difüzyon mekanizması düşük aktivasyon enerjisinde gerçekleşebilir. Genel olarak yüzey difüzyonu tane sınırı difüzyonundan, tane sınırı difüzyonunda kristal kafes sistemi içerisinde ki difüzyondan daha hızlı gerçekleşir (Heitjans ve Karger 2005)



Şekil 3.9. Tane sınırı difüzyonu

3.2.4. Difüzyonu etkileyen faktörler

Sıcaklık

Metal malzemelerdeki difüzyon olayı sıvılarda ve gazlarda görülen difüzyondan daha yavaştır. Çoğu metal malzeme katı halde olduğu için atomlar kafes sistemleriyle sıkı paketlenmiştir. Bu durumda atom yayını yavaş gerçekleşir. Malzeme ısıtıldığında ise atomların titreşim hareketlerinin genliği artmakta ve atomlar arası mesafe büyümektedir. Dolayısıyla buna bağlı olarak sıcaklık artınca atom yayınıının daha hızlı meydana geldiği söylenebilir.

Yüksek sıcaklıklarda atomların difüzyonu için sağlanan enerji, atomların aktivasyon enerjisi engelini aşmasını ve daha kolay bir şekilde yeni kafes yerlerine hareket etmesini sağlar. Düşük sıcaklıklarda, genellikle mutlak ergime sıcaklığının (T_m) yaklaşık $0.4 T_m$ katı altında difüzyon çok yavaştır ve etkili olmayabilir. Bu nedenle seramikler ve metaller için yapılan ısıt işlemler, yüksek sıcaklıklarda yapılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda, atomlar reaksiyonlarını tamamlamak veya denge şartlarına ulaşmak için daha hızlı hareket ederler (Kurt, 1996). Difüzyon sabitinin her $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik sıcaklık artışı ile iki kat büyüdüğü düşünüldüğünde, sıcaklığın difüzyonda ne kadar etkili olduğu görülür (Oğuz 1988).

Yoğunluk (konsantrasyon)

Konsantrasyon, malzemeyi oluşturan elementlerin bölgesel olarak miktarlarını belirten bir kavramdır. İki malzeme arasında gerçekleşen difüzyonda, yayınan element atomları yoğun bölgeden daha az yoğun olan bölgeye doğru hareket ederler. Dolayısıyla elementlerin difüzyon olduğu bölgede yoğunluk arttıkça difüzyon akısı da düşecektir hatta denge durumuna gelince difüzyon duracaktır. (Çelik 1996; Kurt 1996).

Kristal yapısı

Kafes yapısı, boşluk ve ara yer difüzyon mekanizmaları için önemlidir. Kafes yapısı ne kadar sıkı paketlenmiş ise yani atomik dolgu faktörü büyük değere sahipse yapı içerisine atomik yayılım daha zor olacaktır. Demir esaslı malzemeler ısıtıldığında HMK yapıdan YMK yapıya dönüşmekte ve kafes sistemindeki bu değişimle birlikte C atomları ara yer difüzyon mekanizmasıyla yayılmaktadır. Belirli bir sıcaklıkta demir atomlarının difüzyon hızı ferritte(HMK) östenittekinden(YMK) yaklaşık yüz katıdır (Guy 1974).

Alaşım elementleri

Literatürde bir elementin difüzyon olduğu bölgede farklı alaşım elementlerinin bulunmasının difüzyon üzerinde çok fazla tesiri olmadığı belirtilmektedir (Guy 1974). Ancak metal malzemelere daha iyi özellikler kazandırmak için bazı alaşım elementleri kullanılmaktadır. Kullanılan alaşım elementleri bazı durumlarda difüzyonu etkileyebilir. Örneğin çelik içerisine difüzyon olan bir element, çelik içerisinde yer alan alaşım elementleriyle bileşik oluşturmaya meyilli ise difüzyon olan elementle alaşım elementi arasında çelik malzemenin yüzey bölgesinde bileşik oluşacağı için iç kısma doğru difüzyon ilerleyemeyecektir.

Tane boyutu

Tane sınırları arasında meydana gelen difüzyon tane içi difüzyonundan daha hızlıdır. Bu nedenle küçük tane yapısına sahip malzemelerde daha fazla tane aralıkları olduğu için, difüzyon hızı büyük tane yapıları malzemelere nazaran artmaktadır.

3.3. WC-Co Sistemi

WC'ün kullanılma fikri ilk olarak elmas esaslı tel çekme kalıplarına alternatif olarak ortaya çıkmıştır (Upadhyaya 1998). Birinci dünya savaşı ile beraber, takım çeliklerine karbür fazı ilavesi yapılarak farklı bir alanda kullanılmaya başlanan WC, kısa süre sonra Co ile beraber kesici takım yapımında kullanılmaya başlanmıştır (Brookes 1996). Zaman içerisinde gelişimi araştırıldığında WC-Co kesici takım uçlarından başlayıp, kaplama teknolojileri ile gelişen ve ardından günümüzde nano boyutta toz kullanımına uzanan bir süreç görülmektedir.

Bu gelişim sürecinde özellikle tungstene alternatif malzeme arayışının olduğu ve bu amaç doğrultusunda bağlayıcı ve karbür faz modifikasyonlarının yapılmış olduğu göze çarpmaktadır. WC-Co sistemine yapılan karbür fazı ilaveleri zamanla tungsten içermeyen karbürlerin kullanımına kadar ilerlemiştir (Upadhyaya 1998). Lehimlenerek bağlanan takım uçları için maliyet, zaman içerisinde artmış ve lehimlenmek yerine vidayla kolay bir şekilde takılıp sökülebilen uçlar geliştirilmiştir. Bir sonraki adımda ise çok sayıda kenar ve köşeye sahip uçların kullanılmaya başlanmıştır (Cura 2002).

WC aşırı sert malzemeler arasında yer almaktadır. Mekanik özelliklerinden dolayı bu malzemenin işlenmesi veya farklı yöntemlerle sadece bu malzemedan oluşan parçaların üretilmesi zordur. Bu nedenle WC'den parça üretimi büyük çoğunlukla toz metalürjisi ve toz enjeksiyon kalıplama yöntemleriyle yapılmaktadır. Bu yöntemlerdeki uygulamalarda Co, Ni, Fe gibi metaller bağlayıcı faz olarak WC ile beraber kullanılmaktadır. Bağlayıcı faz olarak kullanılan metaller arasında ise arzulanan en iyi tokluk ve süneklik özelliklerini sağlayan metal olarak kobalt tercih edilmektedir. Aynı zamanda kobalt iyi ısılatma özelliğiyle de WC taneciklerini bir arada tutmak için en uygun bağlayıcı özelliği taşımaktadır. Nikel ise genellikle korozyona dirençli parçaların üretiminde ve ağaç plastik işleme uygulamalarında bağlayıcı faz olarak tercih edilir (Gül 1996; Cura 2002). Bu tür sistemlere sementte karbürler denilmektedir. Sementte karbürlerde, WC ve kobalt tozları belirli oranlarda karıştırılarak sıvı faz sinterleme yapılmaktadır. Sıvı faza geçen kobalt yapıdaki porozitenin ortadan kalkmasını sağlar. WC-Co ikili sistemindeki kobalt miktarı, kesme uygulamalarında ağırlıkça % 3-13 arasında değişirken, bazı parçalarda ise bu oran % 30'a kadar çıkabilir. Yapı içerisindeki Co miktarı mekanik özellikleri etkilemektedir (Upadhyaya 2000).

3.3.1. WC-Co sisteminin fiziksel ve mekanik özellikleri

Sementte tungsten karbürlerin mekanik özellikleri, karbür taneciklerinin kompozisyonu, kullanılan bağlayıcı miktarı, tungsten karbürün tane boyutu ve tane boyutu dağılımı ile doğrudan alakalıdır. Uygulamada WC tane boyutu ortalama 30 µm ile mikron altı arasında değişir. Tungsten karbürün ve bağlayıcının oranı ve tane boyutu değiştirilerek istenen sertlik, mukavemet ve tokluğa sahip sert metalleri elde etmek mümkündür (Lassner ve Schubert 1999). Çizelge 5.2'de bazı WC-Co sistemlerinin oranları ve özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.4. WC tabanlı bazı sert metallerin özellikleri (Upadhyaya, 2001)

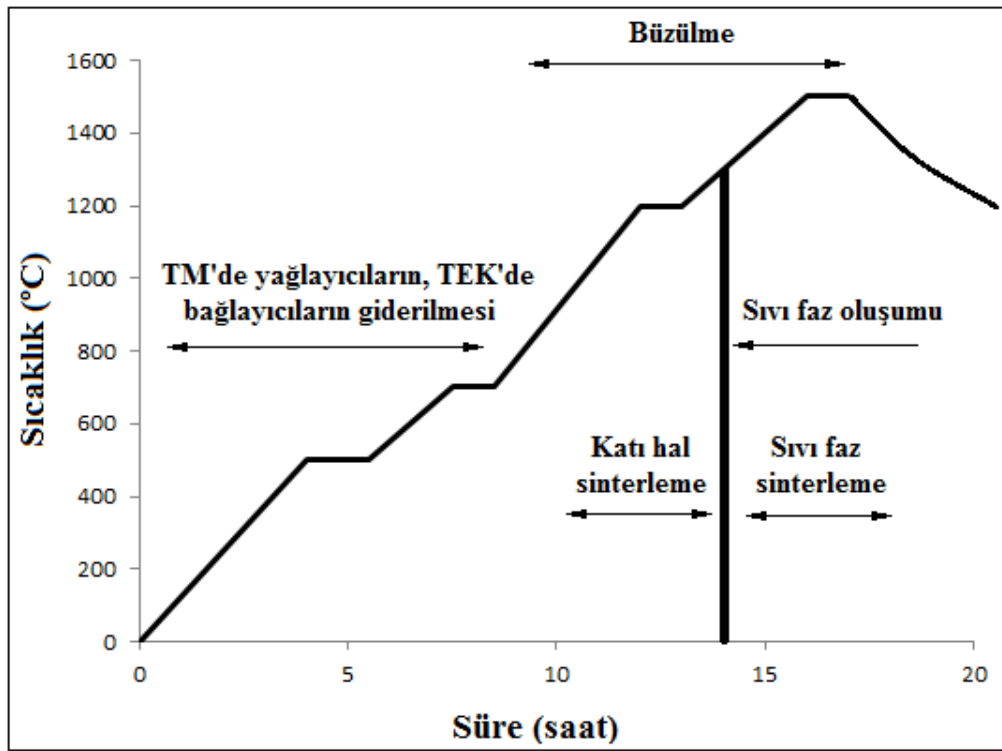
	Bileşim (ağ. %)				
WC	94.0	85.3	75.0	78.5	60
(TiC, TaC, NbC)	---	2.7	---	10.0	31.0
Co	6.0	12.0	25.0	11.5	9.0
Özellikler					
Yoğunluk (g/cm ³)	14,9	14,2	12,9	13,0	10,6
Sertlik (HV ₃₀)	1580	1290	780	1380	1560
Eğme mukavemeti (MPa)	2000	2450	2900	2250	1700
Elastik modül (GPa)	630	580	470	560	520
Kırılma tokluğu (MPa.(m) ^{-1/2})	9,6	12,7	14,5	10,9	8,1
Termal iletkenlik (W/mK)	80	65	50	60	25
Termal genleşme katsayısı (x10 ⁻⁶ /K)	5,5	5,9	7,5	6,4	7,2

Bağlayıcı olarak ağırlıkça %6 Co içeren bir semente karbürün tane boyutunun 6 µm'den 1.7 µm'ye indirilmesi ile sertlik 1170 HV₃₀'dan 1600 HV₃₀'a kadar yükselir. Bu değer tane boyutunun 0.2 µm'ye indirilmesi ile 2300 HV₃₀'a kadar çıkar (Lassner ve Schubert 1999). Genel olarak semente karbürdeki WC tane boyutunun küçülmesi malzemenin sertliğini, basma mukavemetini, kırılma mukavemetini ve eğme mukavemetini artırırken, darbe mukavemeti, kırılma tokluğu gibi mekanik özelliklerin azalmasına sebep olmaktadır. Sert metaldeki kobalt miktarının artması ise sertlikte, elastisite modülünde, basma mukavemetinde düşmeye sebep olurken, eğme mukavemeti ve kırılma tokluğunun artmasını sağlamaktadır. WC taneleriyle bağlayıcı kobalt fazı arasındaki yüksek adhezyon kuvvetleri sayesinde WC-Co, sert metaller içerisinde sertlik-tokluk ilişkisi bakımından en iyi olan bir sistemdir (Canaran 2002; Gül 1996).

3.3.2. WC-Co sisteminin sinterlenmesi

WC-Co'dan parça üretiminde toz metalürjisi ve toz enjeksiyon kalıplama yöntemleri kullanılmaktadır. Her iki yöntemde kalıplama sonrası sinterleme işlemi yapılmaktadır. Toz metalürjisiyle kalıplanan WC-Co tozları, ilk aşamada yağlandırıcıların giderilebilmesi için 400-500°C sıcaklığa kadar ısıtılmaktadır. Daha sonra semente karbürün bileşimine ve WC tozunun tane boyutuna göre belirlenen düzeye kadar (1350-1600°C) sıcaklık artışı devam eder. Toz enjeksiyon kalıplamada ise bağlayıcı olarak plastik, bal mumu ve çeşitli katkıları bulunmaktadır. Sinterleme öncesi kimyasal ve ısı çözündürmeyle kalıplanan parça

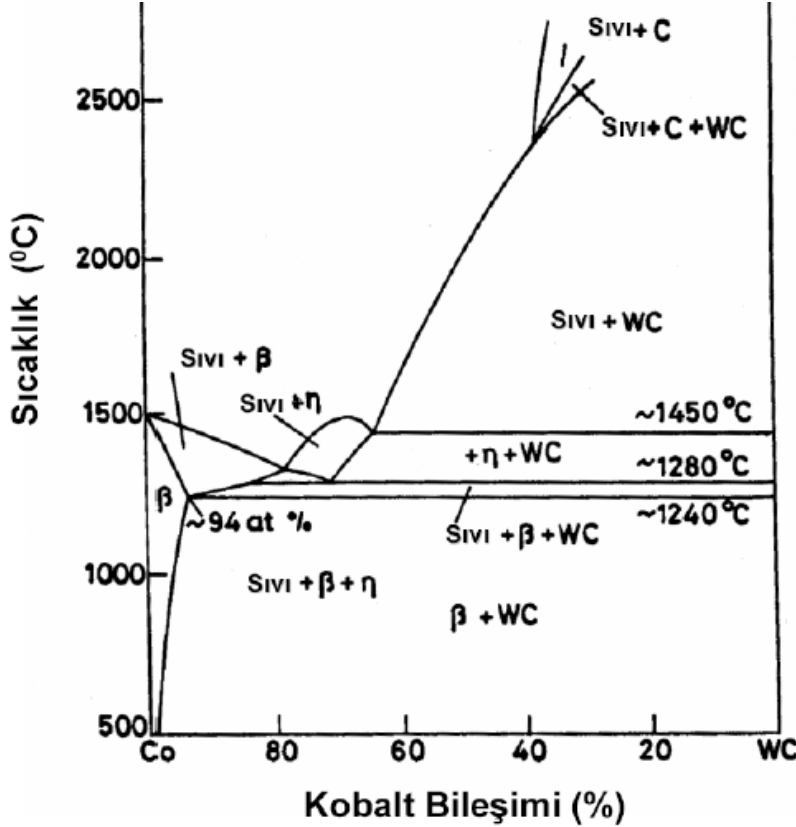
içerinden bağlayıcıların bir kısmı alınır. Daha sonra ön sinterleme ile bağlayıcı olarak kullanılan plastik buharlaştırılarak parça içerisinden yavaş yavaş alınmaktadır. Malzemedeki kalıntı oksijenin oluşturduğu karbonmonoksitin giderilebilmesi için sıcaklık belirli süre belirli noktalarda sabitlenmektedir. Sinterleme işlemi parça büyüklüğüne bağlı olarak bağlayıcı giderme zamanının artmasıyla uzamaktadır. İzotermal sıvı faz sinterlenmesi yaklaşık 1-1.5 saat sürmekte ve yoğunlaşma likidus sıcaklığının hemen altında gerçekleşmeye başlamaktadır. Şekil 3.10'da WC-Co için örnek sinterleme döngüsü verilmiştir.



Şekil 3.10. WC-Co için sinterleme döngüsü

Kobaltın WC taneleri yüzeyinde yayılması ve sinterlenme esnasında meydana gelen kapiller kuvvetler sonucunda mikron altı ve daha ince tane boyutunda kıti hal büzüşmesi gözlenmektedir. Her iki aşamada kobaltın yayılmasının yanı sıra WC kobalt içerisinde kısmi olarak çözünmektedir (Upadhyaya 1998). Tungsten karbür ile kobaltın oluşturduğu sisteme ait denge diyagramına baktığımızda WC-Co'ın ikili ötektik sıcaklığı 1310°C, W-C-Co'ın üçlü ötektik sıcaklığı ise 1275- 1280°C'dir (Şekil 3.11). 1300-1340°C civarında kısmi ergime meydana gelmektedir. Sıvı faz, WC yüzeylerinden çözünmeye neden olur. Partiküllerin morfolojisi yuvarlaktan prizmatığe (düşük enerjili ara yüz oluşumu) dönüşür. Ayrıca eriyiğin büyük açılı tane sınırlarına girmesiyle büyük polikristal karbür partikülleri

parçalanır. İzotermal sinterleme sırasında, çözünme/yeniden çökelme ve/veya birleşme süreçleriyle mikro yapı düzenlenir. Bu sayede kobaltın sistem içerisinde düzgün dağılımı sağlanır. Sinterlemede çok yüksek sıcaklıklara çıkılması ve uzun süre beklenmesi istenmeyen tane büyümesiyle sonuçlanabilir (Lassner ve Schubert, 1999).



Şekil 3.11. WC-Co faz diyagramı (Upadhyaya 1998)

WC-Co sistemi için, karbon dengesi çok önemli bir parametredir. Karbon dengesi kullanılan tozda bulunan oksijen miktarı ve sinterleme atmosferinden etkilenir. Soğutma sırasında çözülmüş WC, mevcut WC taneleri üzerine çökelir. Katı çözelti içindeki W ve C miktarı sistemin C miktarına ve soğutma hızına bağlıdır. Sinterleme sırasında karbon dengesinin muhafaza edilmesi deneysel olarak bulunur ve bu durum düşük Co miktarları için oldukça zordur (Lassner ve Schubert 1999).

Tungsten karbür ve kobaltın farklı genleşme katsayılarına sahip olmaları nedeniyle, bağlayıcı faz çekme gerilmesi, karbür ise basma gerilmesi altındadır. Düzensiz makroskobik gerilmeler sinterlenmiş parçada bozukluklara neden olabilir. Sinterleme sırasında çekme lineer ölçekte % 15–20, hacimsel olarak % 25–40 mertebelerindedir (

Heng ve diğerleri 2013; Baojun ve diğerleri 2002). Çekme miktarı WC toz partiküllerinin boyutuna, öğütme ve şekillendirme koşullarına ve kompozisyona bağlıdır (Lassner ve Schubert 1999).

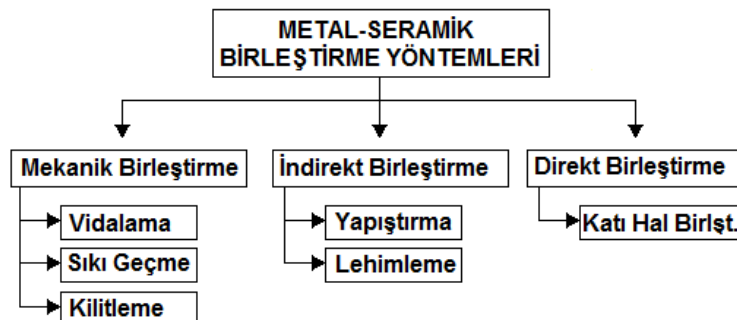
3.3.3. WC-Co'ın kullanım alanları

Uygulama alanlarına baktığımızda, üretilen sert metallerin %67'si kesici uçlarda kullanılmaktadır. Madencilik, petrol arama ve tünel endüstrisindeki kullanımı %13 civarındadır. Bu oran ağaç işçiliğinde %11 iken inşaat sektöründe %9 civarındadır. Takım uçlarında seksenli yıllara kadar yüksek hız çeliklerinin kullanımı daha fazla iken bu oran günümüzde %50 sert metal, %45 HSS, %4 seramik ve %1 cBN ile PCD'dir (Cura 2002).

3.4. Metal ve Seramik Malzemelerin Birleştirilmesi

Seramik malzemeler üstün özelliklerinin yanı sıra kırılabilirler ve bu durum seramik malzemelerden parça yapımı konusunda engel teşkil etmektedir. Bu sorunun çözümü için seramik malzemeler, metal malzemelerle birleştirilerek kırılmaya karşı daha dirençli hale getirilebilir. Kesici takım teknolojilerinden elektronik ekipmanların yapımına kadar birçok alanda kaydedilen ilerlemeler üzerinde seramik metal birleştirme tekniklerindeki geliştirilmeler önemli katkı sağlamıştır (Watkins 1991)

Seramik ve metal malzemeler mekanik, direkt ve indirekt yollarla birleştirilebilir. (Şekil 6.1) Mekanik birleştirme çeşitlerini vidalama, kilitleme ve sıkı geçme olarak gruplandırabiliriz. Bu tür birleştirmeler basit ve ekonomiktir. Bağ dayanımı 10-50 MPa arasında değişmektedir. Özellikle seramik tarafındaki gerilmeler ve tasarım sınırlılığı, bu yöntemin kullanımını kısıtlamaktadır.

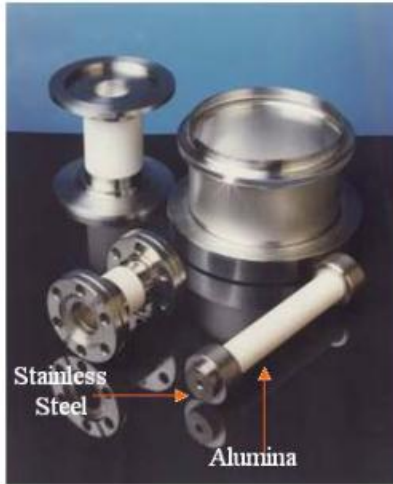


Şekil 3.12. Metal-Seramik birleştirme yöntemleri

Yapıştırma ve lehimleme olarak adlandırılan, dolaylı olarak birleştirme yöntemlerinde ilave malzeme kullanılmaktadır. Yapıştırma işleminde iki malzeme arasındaki bağlantı, moleküller, iyonlar ve atomlar arası etkileşimden dolayı oluşan çekim kuvvetleriyle sağlanır. Birleştirmede kullanılan yapıştırıcılar sıvı, katı, macun, bant gibi birçok fiziksel şekilde olabilir. Elde edilen birleştirmelerin sıcaklık direnci 250 °C den düşük olmakla birlikte mekanik dayanımı da düşüktür (Martinelli, 1996).

Lehimlemeyi, kullanılan ilave metale bağlı olarak yumuşak ve sert lehimleme olarak iki gruba ayırabiliriz. Genelde 450 °C altında yapılan birleştirme uygulamaları yumuşak lehimleme olarak adlandırılır. Özellikle elektronik sektöründe, bakır ve alüminyum alaşımlarının birleştirilmesi işlemlerinde kullanılır. En çok kullanılan lehimleme malzemesi Sn ve Pb alaşımıdır. Sert lehimleme ise 400 - 600 °C sıcaklıklar arasında eriyebilen lehim alaşımları kullanılarak yapılır ve birleştirilen esas malzemelerle lehim alaşımı arasında metalürjik bir bağ oluşmasıyla birleşme sağlanır (Milli Eğitim Bakanlığı 2011). Si_3N_4 , SiC, Al_2O_3 , AlN and ZrO_2 gibi yapısal seramik malzemeler metallerle sert lehimleme uygulamalarıyla birleştirilirler (Huh ve Kim 1997). Bu malzemelerin birleştirilmesiyle elde edilen birleşme dayanımı 100 MPa ve sıcaklık direnci 500 °C civarındadır (Martinelli, 1996). Lehimleme, iş parçalarını ıslatan sıvı faza bağlıdır. Klasik lehim alaşımlarının birçoğu seramik yüzeylerini ıslatmazlar. Bu yüzden, ya lehimlemeden önce seramik yüzeyleri metale hale getirilir veya aktif lehim alaşımları kullanılarak direkt lehimleme işlemi yapılır. Lehim alaşımlarının nispeten yüksek toklukları, farklı malzemelerin birleştirilmesi esnasında ortaya çıkan ısı gerilmelerinin azalmasını sağlamaktadır (Santella 1992).

Difüzyon, füzyon ve lazer kaynağı gibi yöntemler kullanılarak metal ve seramik malzemeler arasında katı hal birleştirmeler elde edilmektedir. Bu yöntemlerde sıcaklıklar 1000 °C civarındadır. Esas malzemeler arasında elde edilen birleştirmenin dayanımı 100-1000 MPa arasındadır. Difüzyon kaynağında, fiziksel özelliklerden kaynaklanan birleştirilen malzemeler arasındaki gerilmeleri azaltmak ve bağ dayanımını arttırmak için ara tabakalar kullanılmaktadır (Schwartz 1990). Şekil 3.13’de metal seramik birleştirmeler için bazı örnek parçalar verilmiştir.



Şekil 3.13. Seramik-metal malzemelerin birleştirilmesiyle üretilen parçalar (Schwartz 1990)

3.4.1. Metal- seramik birleştirmelerde ara katman kullanımı

Genel olarak bütün yöntemlerde seramiğe birleştirilecek olan metal malzemenin seramiğe ıslatması gerektiği ve bununla birleşme yüzeyi boyunca açıklık kalmadan birleşmenin sağlanabileceği belirtilmektedir (Akkoca 1994; Zhang 2002). Seramik malzemeler metal malzemelerle direkt olarak birleştirilmek istendiğinde seramik malzemelerin kimyasal kararlılığından dolayı ara kesitte açıklık kalabilir ve yeterli bağ dayanımı elde edilemeyebilir. Bununla birlikte seramik ve metal malzemelerin termal genişleme katsayılarının farklı olmasından dolayı malzemeler soğurken farklı oranda daralacağı için ara kesitte kalıntı gerilmeler ve mikro çatlaklar oluşacaktır. Bu sorunları azaltmak için metal- seramik birleştirmelerde ara katman kullanımı oldukça yaygındır ve genellikle metal ve seramik malzemenin termal genişlemelerini birbirine yaklaştıracak uygun ara tabakalar kullanılmaktadır (Kurt 1996; Aydın 2008). Arayüzey bağlanmasında genellikle Ag, Cu, Zn, Al gibi düşük ergime sıcaklıklı malzemeler veya Ag-Cu-Ti, Ag Cu, Ti-Ni, Ti-Al, Ag- Ti-Zn alaşımları ara tabaka olarak tercih edilmektedir (Jadoon 2004; Zhou, Zhong ve Ge 2007). Birleştirilen malzemelerin ergime sıcaklıkları da ara tabaka seçimini etkilemektedir. WC-Co ve çelik malzemeler birleştirilirken Ni ara katman kullanılmasıyla daha iyi sonuçlar alınmıştır (Chen ve diğerleri 2013).

İdeal bir ara katman yüksek plastisiteye sahip olmakla birlikte termal genişleme katsayısı metal ve seramik malzemelerin termal genişleme katsayıları arasında bir değerde olmalıdır (Jadoon 2004). Ara katman kullanımıyla, ara katmanın metale difüzyonu seramiğe

infiltrasyonu sağlanarak birleştirme bölgesinde boşluk kalması engellenir tamamen birbirine temasta olan iki ara yüzey elde edileceği için ara kesitteki hatalar azaltılmış olur. Ayrıca birleştirme işlemi için uygulanan sıcaklıkta eriyebilen ara katman işlem sonunda soğuma esnasında deformasyonla şekil değiştirerek kalıntı gerilmelerin azalmasına da fayda sağlamaktadır (Chen ve diğerleri 2013).

Özellikle fiziksel ve kimyasal özellikleri birbirinden farklı olan metal ve seramik malzemelerin birleştirilmesinde ara katman seçimi önemlidir. Birleştirilen malzeme özelliklerine uygun olarak seçilen ara katman ara bölgenin mukavemetini önemli ölçüde arttırmaktadır. Ara katman seçimi yapılırken malzemeler arasında birleşme mukavemeti açısından yeterli difüzyonun sağlanması ve farklı özelliklerden dolayı ortaya çıkabilecek hataların azaltılması için aşağıdaki hususlar dikkate alınmalıdır.

- 1- Birleştirilecek malzemeler ve ara katmanın ergime sıcaklıkları birbirine yakın olmalı
- 2- Ara katman birleştirme sonrasında malzemeler arasındaki termal genişleme farkını tolere edebilmeli
- 3- Ara katman ara bölgede intermetalik yapı oluşumunu azaltabilmeli
- 4- Birleştirilen malzemelerle ara katmanın mukavemet değerleri yakın olmalı
- 5- Kolay difüzyon olması için birleştirilen malzemelerle ara katman malzemesinin atom çapları % 15 ten fazla farklı olmamalıdır.
- 6- Ara katman birleştirilen malzemelerle bileşik oluşturmadan difüzyon olabilmelidir.
- 7- Difüzyon için uygun kristal kafes sistemine sahip olmalıdır.

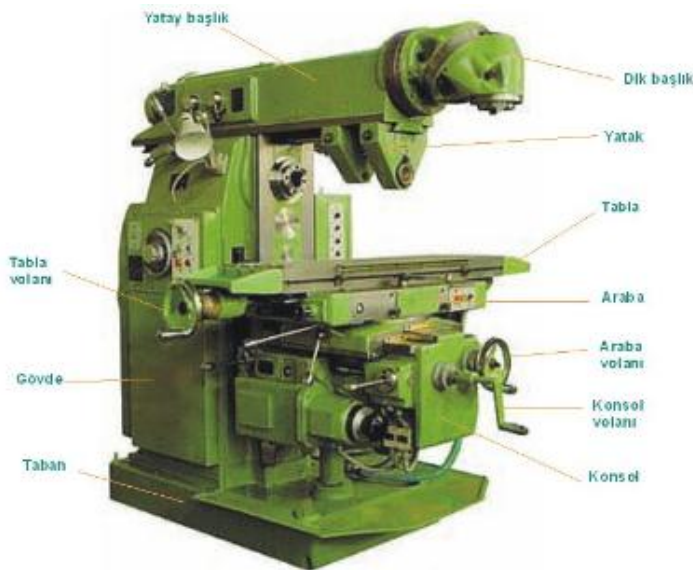
Ara katman seçininde dikkat edilmesi gereken kriterlere göre yaygın olarak kullanılan ara katman malzemelerinin bazı özellikleri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Literatürde ara katman olarak kullanılan mataller ve özellikleri

Elementler Özellikler	Sn	Pb	Zn	Mg	Al	Ag	Cu	Ni	Co	Fe	Pt	Cr	Ti	Mo
Ergime sıcaklığı (°C)	232	327	419	650	660	961	1083	1455	1495	1539	1773	1890	1941	2625
Kaynama sıcaklığı (°C)	2270	1740	906	1110	2060	2210	2600	2730	2900	2740	4410	2500	3560	4800
Özgül ağırlık (g/cm ³)	7.30	11.34	7.10	1.75	2.7	10.49	8.96	8.9	8.9	7.87	21.45	7.19	4.5	10.2
Atom Yarıçapı (nm)	0,158	0,175	0,137	0,160	0,145	0,144	0,128	0,125	0,125	0,124	0,139	0,128	0,147	0,140
Aktivasyon enerjisi (kJ/mol)	105	109	99	-	142	185	213	298	292	239	294	318	259	418
Isıl genleşme (10 ⁻⁶ /°C)	22	28.9	30.2	24.8	23.1	18.9	16.5	13.4	13	11.8	8.8	4.9	8.6	4.8
Kafes sistemi	Tetragonal	YMK	SPH	SPH	YMK	YMK	YMK	YMK	SPH	HMK	YMK	HMK	SPH	HMK

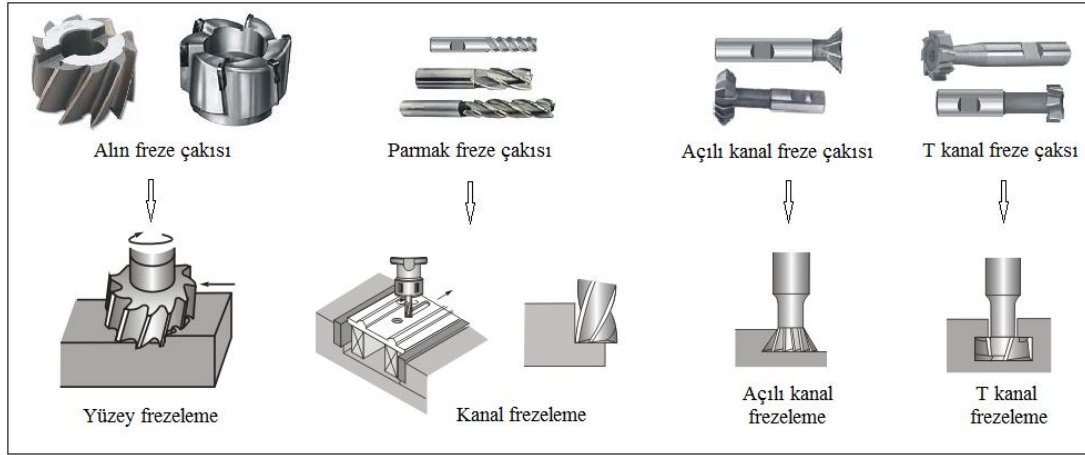
3.5. Frezeleme

Freze tezgâhlarında; dönen bir kesici takım ile iş parçasının doğrusal hareketi sonucunda malzeme üzerinden talaş kaldırmak suretiyle biçim verme işlemlerine “frezeleme” adı verilir. Frezeleme işleminde kullanılan kesiciye (çakıya) “freze”, bağlandıkları iş tezgâhlarına ise “freze tezgâhı” denir (Şekil 3.14). Frezeleme genellikle düzlem yüzeylerin, dik köşelerin ve kanalların işlenmesi amacıyla kullanılan bir işlemdir (İpekçioğlu 1984; Çakır 2000).



Şekil 3.14. Freze tezgahı

Frezeleme uygulamaları en genel halde, çevresel ve alın frezeleme uygulamalarından veya bu iki metodun bileşiminden oluşur. Geniş yüzeylerin işlenmesi için alın frezeleme genellikle daha verimli olurken çevresel frezeleme özellikle kanallar için belirli bir üstünlüğe sahiptir (Turgut 2007). Şekil 3.15’de bazı frezeleme işlemleri ve kullanılan freze çakıları verilmiştir.



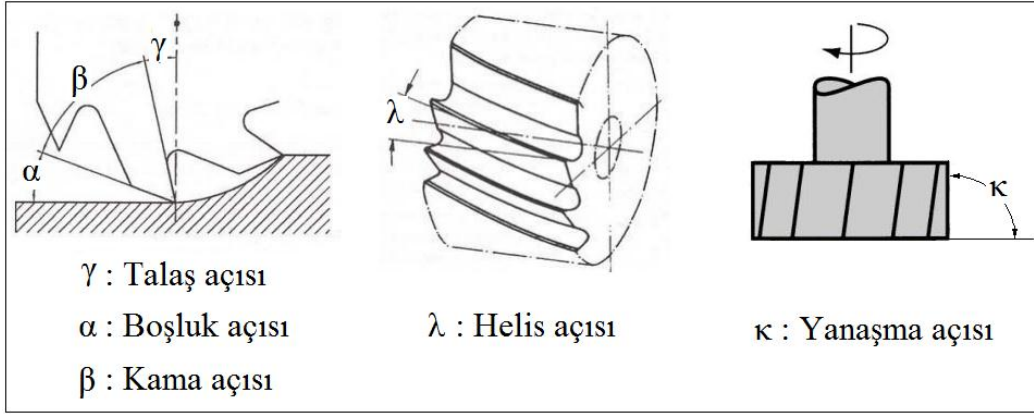
Şekil 3.15. Frezeleme işlemleri ve kullanılan freze çakıları (Nebiler 2005)

3.5.1. Frezelemede talaş kaldırma

Talaş kaldırma işleminde, kesici takım belirli kuvvet ve doğrultuda iş parçası üzerinde hareket ettirildiği zaman takım ucunun temas ettiği malzeme katmanında, önce elastik daha sonrada plastik şekil değişiklikleri oluşarak malzemede akımlar başlar (Şeker 2009). Gerilmeler malzemenin kopma sınırını geçtiği anda “talaş” olarak adlandırılan belirli bir yüzey tabakası, iş parçası boyunca parçadan ayrılır. Talaşın ayrılış biçimi, parça malzemesinin mekanik özelliklerine ve kesme şartlarına bağlı olarak farklı bir şekilde gerçekleşir ve oluşan talaşın şeklinden bazı işlenebilirlik sonuçlarını değerlendirmek mümkündür. Bu nedenle, talaş kaldırma işlemine etki eden faktörlerin bilinmesi ve birbirine etkilerinin dikkate alınması gereklidir (Groover 2007).

3.5.2. Frezelemede takım geometrisi

Şekil 3.16’da freze çakısında bulunan açılar görülmektedir. Çakıya verilen talaş, boşluk, kama ve helis açıları çakı geometrisini oluştururken iş parçasıyla kesici kenar arasındaki açı da yanaşma açısı olarak ifade edilmektedir.



Şekil 3.16. Freze çakısına verilen açılar

Boşluk açısı, kesici kenarının arka yüzeyinin iş parçasına sürtünmesini engellemek amacıyla verilir. Bu açının değeri genelde 8° - 12° arasında olmakla beraber kesici takım/iş parçası malzemesine göre değişmektedir.

Talaş açısı, talaşın kesici takım yüzeyinden akarak uzaklaşmasını sağlayan açı olup bu açı genellikle pozitif olarak verilir. Genel olarak, talaş açısının artması ile kesme kuvvetleri azalır ve daha iyi bitirme yüzeyi elde edilir.

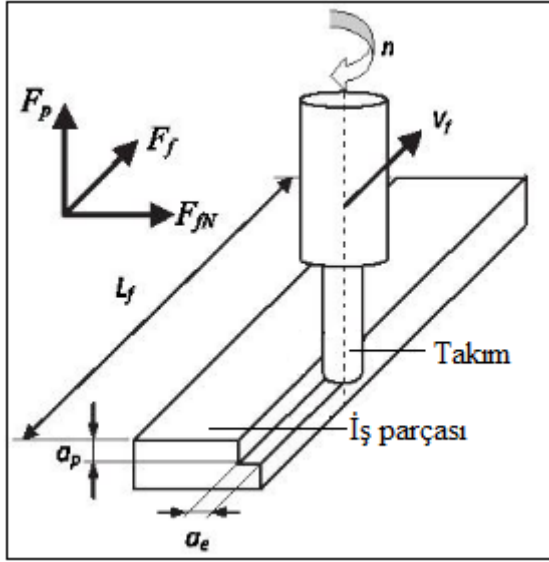
Kama açısı, talaş ve boşluk açısı arasında kalan açıdır ve kesici takımı oluşturan dişlerin dayanımı kama açısına bağlıdır.

Yanaşma açısı kesici ucun ana, ön kesme kenarı ile iş parçası yüzeyi arasındaki açıdır. Talaş kalınlığı, kesme kuvvetleri ve takım ömrü, özellikle yanaşma açısından etkilenir. Yanaşma açısı ne kadar küçük olursa, talaş kalınlığı o kadar ince olur ve kesme kuvveti daha büyük bir kenar uzunluğuna yayılır. Bu durumda kesici kenar üzerine gelen yük azalır ve daha yüksek diş başına ilerleme değerlerinde çalışmak mümkün olur. Fakat daha küçük bir yanaşma açısı belirli bir kenar uzunluğu için daha küçük bir kesme derinliği kapasitesi demektir. Küçük yanaşma açıları, talaş akışı ve kesici kenarın kullanımı açısından daha olumludur (Çakır 1999).

3.5.3. Frezeleme oluşan kesme kuvvetleri

Frezelemede, talaş kaldırma sürecinde oluşan kesme kuvvetleri değişkenlik gösterir. Bu nedenle, pratikte hesapları kolaylaştırmak için ortalama talaş kesitine karşılık gelen

ortalama kesme kuvvetleri alınır. Frezelemede genellikle aynı anda birden çok kesici diş talaş kaldırdığından kuvvetler, bir kesici uca karşılık gelen ortalama talaş kaldırma kuvvetiyle ifade edilirler. Ortalama talaş kaldırma kuvveti, F_p ile gösterilen pasif kuvvet, F_f ile gösterilen ilerleme kuvveti ve F_{fn} ile gösterilen normal ilerleme kuvveti bileşenlerinden oluşur (Şekil 3.17) Şahin 2000).



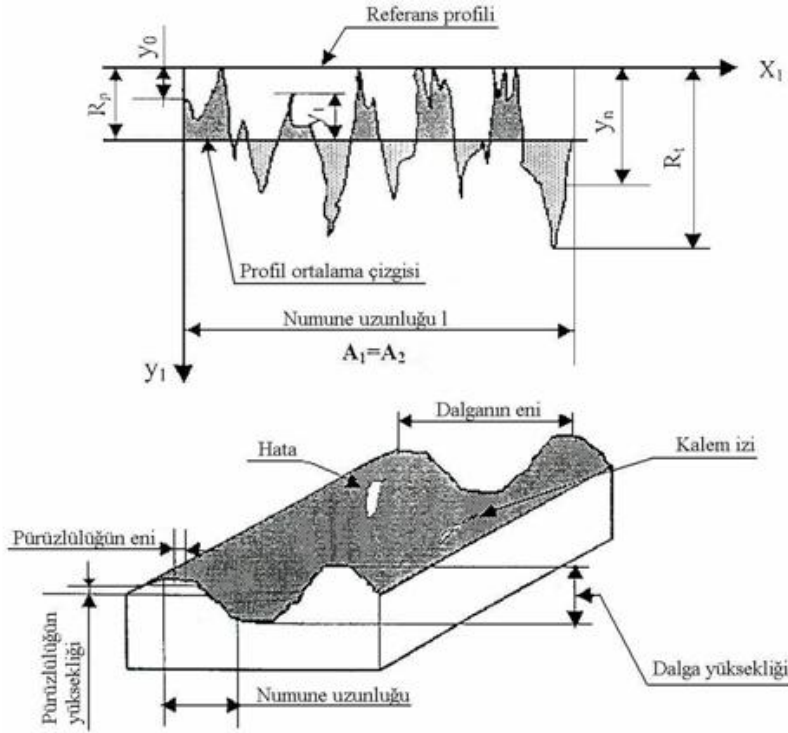
Şekil 3.17. Frezelemede oluşan kuvvetler

Frezeleme işlemlerinde oluşan kuvvetler; frezeleme yöntemi, kesici takım ve iş parçası malzemesi, takım ve iş parçası geometrisi, iş mili sehim, kesici kenarlar arası mesafe, eğim açısı, ilerleme miktarı, kesme derinliği ve aşınma gibi faktörlere bağlıdır (Ay, Erdoğan ve Kurt 2003).

3.5.4. Yüzey pürüzlülüğü

Yüzey kalitesi, parça yüzeyinde kesici takımın bıraktığı izlerden ve baskılardan meydana gelen girinti ve çıkıntı olarak ifade edilmektedir. Parçanın yüzey kalitesini gösteren pürüzlülük iki türdür. Birincisi çok küçük yüzeysel hatalardan meydana gelen ve yüzey pürüzlülüğü denilen mikro geometrik düzgünsüzlük, ikincisi parçanın ideal şeklinden sapmalarını belirten ve form düzgünsüzlüğü (makro dalgalanmalar) denilen geometrik bozukluktur (Şekil 3.18). Tamamen giderilemeyecek şekilde olan ve ekonomik bakımdan uygun görülen her iki yüzey düzgünsüzlüğü parçanın fonksiyonuna göre belirli sınırlar içerisinde tutulması gerekir. Bu sınırlar fonksiyonel ve ekonomik faktörler göz

önüne alınarak tayin edilir. Yüzey pürüzlülüğü Şekil 3.18’de görüldüğü gibi birtakım girinti ve çıkıntılardan meydana gelir (Akkurt 1992).



Şekil 3.18. Yüzey pürüzlülüğü (Akkurt 1992)

4. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde deneylerde kullanılan malzeme, takım, ekipmanlar ve yöntem açıklanmıştır.

4.1. Malzeme

4.1.1. Besleme stoku

Deneylerde WC-Co besleme stoku kullanılarak insörtlü parça üretimi araştırılmıştır. Üretilecek parçanın iç kısmında farklı insörtler dış kısmında ise WC-Co(%9) besleme stoku kullanılmıştır. Besleme stoku Ryer firmasından hazır olarak alınmıştır (Resim 4.1). Besleme stokuna ait bazı özellikler aşağıda verilmiştir (Çizelge 4.1, Çizelge 4.2).

Çizelge 4.1.WC- %9 Co besleme stoğunun özellikleri

Toz şekli	Erime indeksi	yoğunluk	Toz boyutu (μm)		
Karmaşık şekilli	(2.160 Kg)	8.0600g/cm ³	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀
			0,15	0,28	0,52

Çizelge 4.2.WC malzemenin fiziksel özellikleri

Özgül ağırlık (20 °C de)	Erime sıcaklığı	Isıl iletkenlik (20 °C de)	Basma dayanımı (20 °C de)	Isıl genleşme (100-700 °C)
15,6 g/cm ³	2785–2830 °C	110 W/(m.K)	3000-6000 MPa	4-5 10 ⁻⁶ m/(m.K)



Resim 4.1. WC-%9Co besleme stoku

4.1.2. İnsört olarak kullanılan malzemeler

İTEK yöntemiyle WC-Co besleme stokundan parça üretebilmek için tokluğu iyi olduğundan dolayı M2 tipi HSS ve karbon oranının düşük olmasıyla birlikte içerisinde

nikel olduğu için 4340 malzemeler insört olarak kullanılmıştır. İnsört malzemelerinin kimyasal bileşimi Çizelge 4.3’te verilmiştir.

Çizelge 4.3.İnsört olarak kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimi

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	Co	P	S	
HSS	0,92	0,26	0,28	3,91	4,87	0	1,71	6,19	-	0,026	0,001	
4340	0,39	0,22	0,67	0,78	0,24	1,74	-	-	-	0,025	0,025	

4.1.3. Ara katman Seçimi

Farklı malzemeler birleştirilirken ara katman kullanımı ara bölgenin mukavemetini arttırmaktadır. Ancak birleştirilen malzemelerin özelliklerine uygun ara katman seçilmelidir. Çizelge 6.1 ve ara katman seçiminde dikkat edilmesi gereken kriterlere göre hem uygulanabilirliği hem de özellikleri bakımından ara katman olarak nikel ve bakır malzemelerin WC-Co ve çelik için daha uygun olduğu belirlenmiştir.

4.1.4. Performans testlerinde kullanılan malzeme

İTEK yöntemiyle geliştirilen T-kanal freze çakısıyla orijinal yekpare karbür T-kanal çakının (Karcan firmanın üretimini yaptığı orijinal takım) performansları işleme deneyleri yapılarak karşılaştırılmıştır. Orijinal yekpare karbür çakı silah endüstrisinde yaygın olarak Al 7075 T6 malzeme üzerine kanal açmak için kullanılmaktadır. Bu yüzden işleme deneylerinde Al 7075 T6 malzeme tercih edilmiştir. Al 7075 T6 malzemenin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.4.Al 7075 T6 malzemenin kimyasal bileşimi (%)

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Diğer	Al
0,5	0,5	1,2-2,0	0,3	2,1-2,9	5,1-6,1	0,18-0,28	0,25	0,15	Kalan

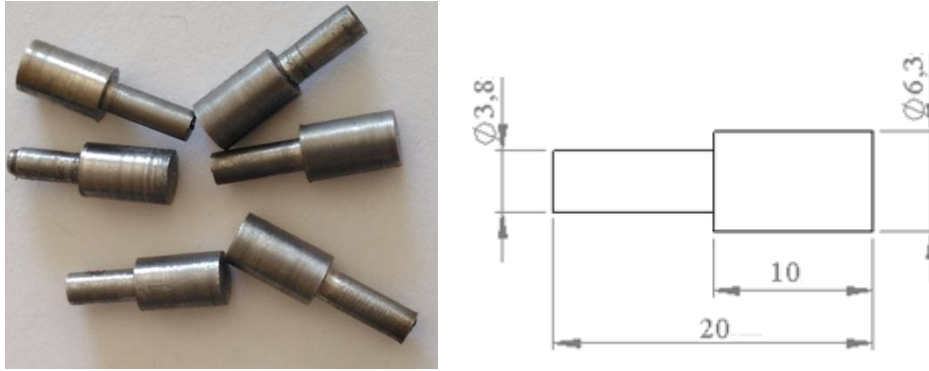
Çizelge 4.5.Al 7075 T6 malzemenin mekanik özellikleri

Akma mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HB)
460-505	530-570	10	140-460

4.2. Yöntem

4.2.1. İnsörtlerin hazırlanması

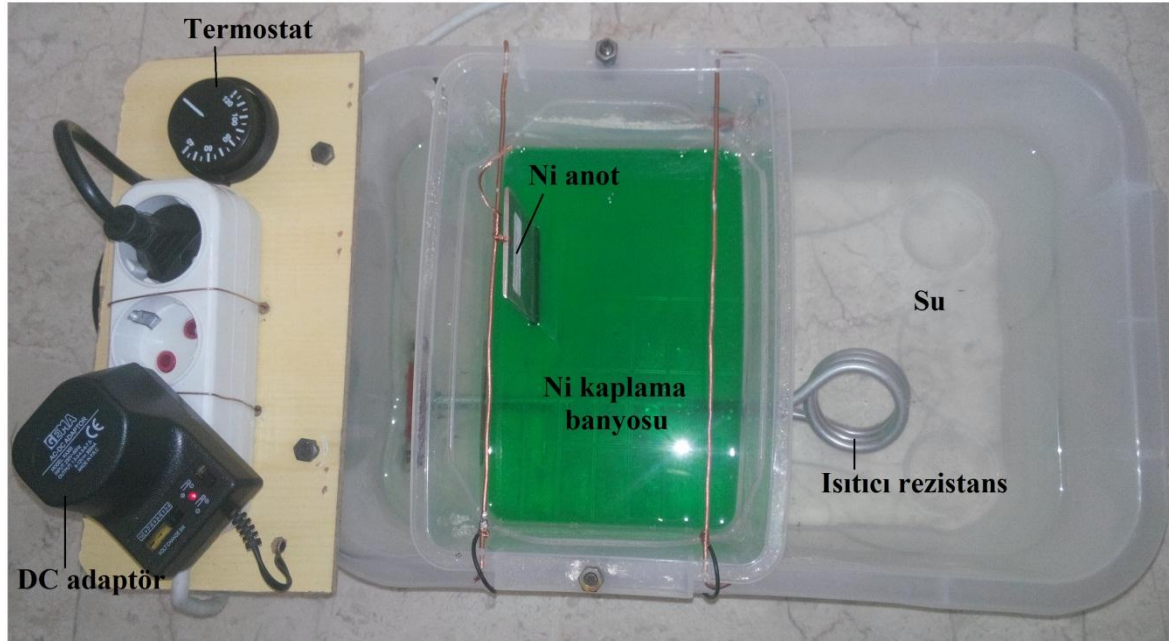
HSS ve 4340 malzemeler torna tezgahıyla Resim 4.2'deki ölçülerde işlenerek insört haline getirilmiştir.



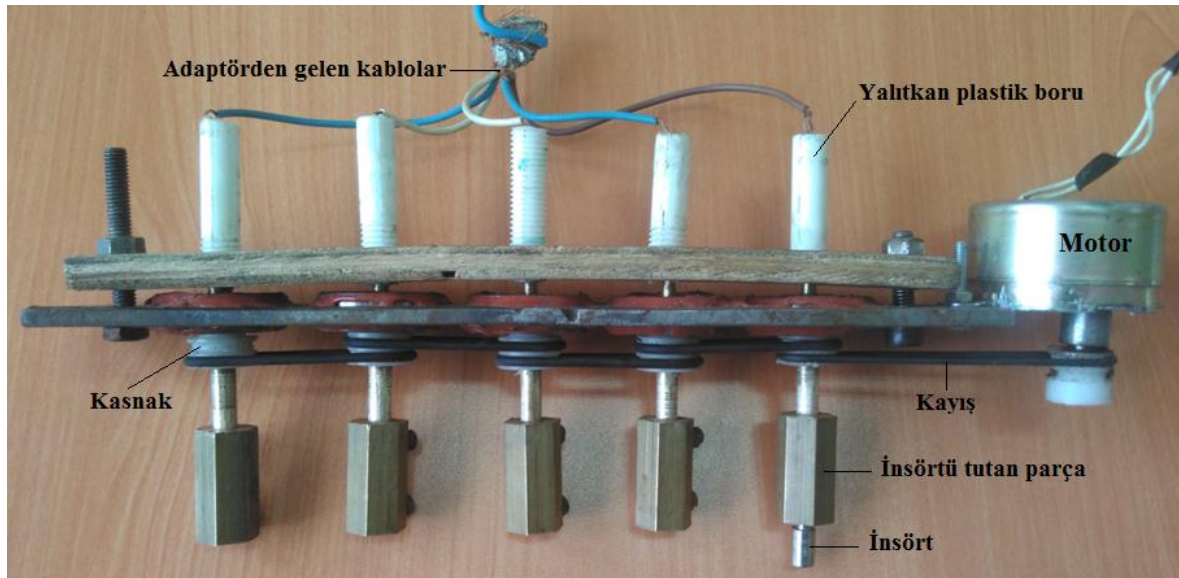
Resim 4.2. Kullanılan insörtler ve ölçüleri (mm)

4.2.2. Ara katman malzemesinin insört üzerine uygulanması

Literatürde düzlemsel parçalar birleştirilirken genellikle hazır ince levha şeklinde ara katman malzemesi kullanıldığı görülmüştür (Jadoon ve diğerleri 2004; Aydın 2008). Ancak yapılan çalışmada insörtler silindirik olduğu için bu mümkün değildir. Bu yüzden nikel ve bakır ara katmanlar insörtlerin üzerine elektrolitik kaplama yöntemiyle uygulanmıştır. Elektrolitik kaplama için Teknik Döküm firmasından hazır olarak nikel ve bakır kaplama banyoları ve anotlar alınmıştır. Sıcaklık kontrollü, voltaj değerleri ayarlanabilen ve 5 adet insörtü döndürerek kaplayabilme kapasitesine sahip elektrolitik kaplama sistemi yapılmıştır (Resim 4.3).



a)



b)

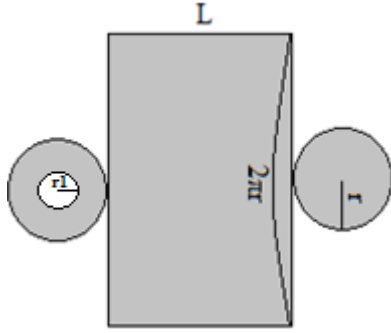
Resim 4.3. Elektrolitik kaplama sistemi a) kaplama banyosu b) döndürme düzeneği

Kaplama işlemi Çizelge 4.6'da verilen, kaplama banyosu üretici firmanın tavsiye ettiği şartlarda yapılmıştır.

Çizelge 4.6. Elektrolitik nikel ve bakır kaplama şartları

Anot	Banyo sıcaklığı	Voltaj	Akım yoğunluğu	Bekleme süresi
Elektrolitik Nikel	50-60 °C	2,5-3 V	4A/dm ²	1 µm için 2 dakika
Elektrolitik Bakır	50-60 °C	1,5-2 V	3A/dm ²	1 µm için 2 dakika

İnsörtün kaplanan kısmının yüzey alanı (Şekil 4.1) Eş. 4.1'den hesaplanarak sistem için gerekli akım yoğunluğu bulunmuştur.



Şekil 4.1. İnsörtün yüzey alanı

$$Y.A. = 2\pi r \times L + 2\pi r^2 - \pi r_1^2 \quad (4.1)$$

$\pi:3,14$

r: insört yarıçapı (0,0315 dm)

r1: insört sapının yarıçapı (0,0315 dm)

L: insört boyu (0,1 dm)

$$Y.A. = (2\pi \times 0,0315 \times 0,1) + 2\pi(0,0315)^2 - \pi(0,02)^2$$

$$Y.A. = 0,0247 \text{ dm}^2 \text{ (1 insörtün yüzey alanı)}$$

$$\text{Kaplanan 5 adet insörtün yüzey alanı} = 0,0247 \times 5 = 0,123 \text{ dm}^2$$

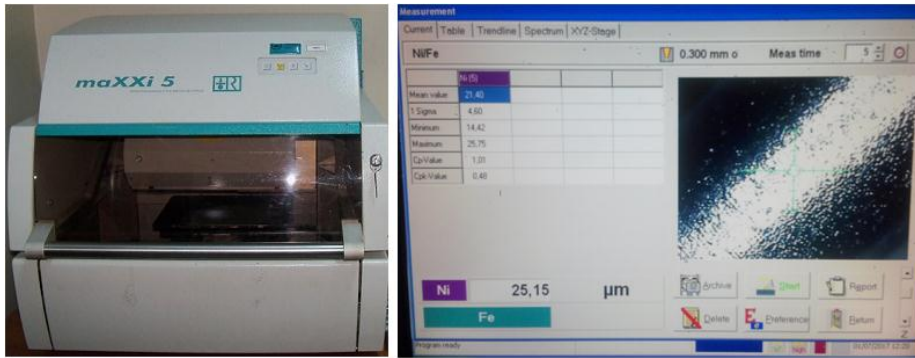
Nikel kaplama yaparken 1dm² yüzey alanı için 4 A akım verilmelidir. 5 adet insört kaplanırken toplam yüzey alanı 0,123 dm² olduğu için oranlandığında gereken akım 0,492 A'dir.

Kaplama işlemi öncesi insörtler ultrasonik yıkama cihazıyla temizlenmiş ve motorlu döndürme sistemine bağlanmıştır. Sistem adaptörünün voltajı 3V'a ayarlanmıştır. Kaplama banyosunun sıcaklığı termometreyle kontrol edilerek firmanın tavsiye ettiği sıcaklığa ulaştığında insörtler banyo içerisine daldırılmıştır. İnsörtler 1µm için 2 dakika bekleme süresinde döndürülerek 25µm-50µm-100µm kalınlıklarda kaplanmıştır (Resim 4.4).



Resim 4.4. Kaplanan insörtler a) bakır kaplı, b) nikel kaplı

Kaplama kalınlığının doğruluğunu kontrol etmek amacıyla Doğuş kimya laboratuvarında bulunan maXXi 5 X-ray ölçme cihazıyla çap yüzeyinden kalınlık ölçümü yapılmıştır (Şekil 4.5). Ölçme işlemi sonrasında Ni ve Cu ara katmanların $\pm 3-5$ μm toleransla kaplandığı görülmüştür.



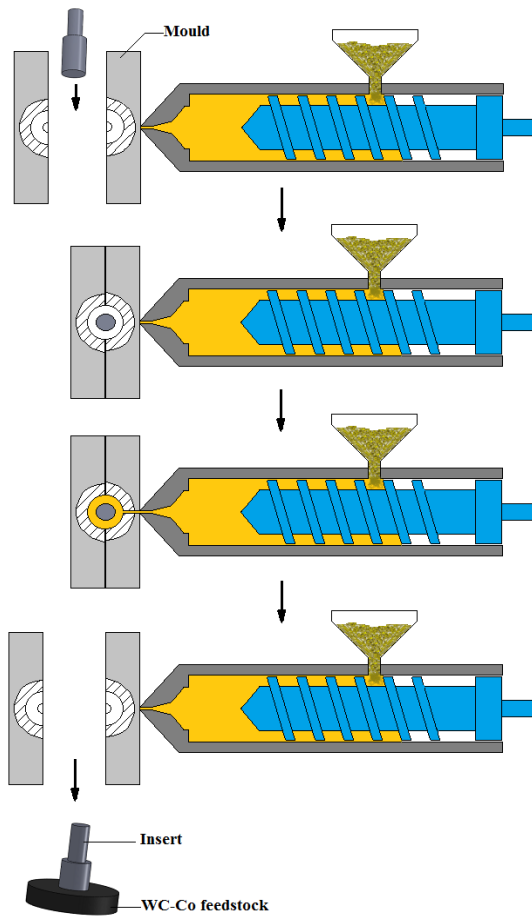
Resim 4.5. maXXi 5 X-ray ölçme cihazı

4.2.3. Termogravimetrik analiz (TGA) analizi

Besleme stokunun termal özellikleri enjeksiyon, bağlayıcı giderme ve sinterleme parametrelerinin belirlenmesinde etkilidir. Bu nedenle TGA analizi yapılarak hangi sıcaklıkta besleme stoğunda bağlayıcı kayıpları başladığı tespit edilebilir. Deneyler de kullanılan WC-%9Co besleme stokunun termal özelliklerini tespit edebilmek için Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü Süper İletken laboratuvarında bulunan Exstar S11 7300 markalı cihazda TGA analizi yapılmıştır. TGA analizi sonucunda hangi sıcaklıkta bağlayıcı kayıpları meydana geldiği tespit edilerek bağlayıcı giderme ve sinterleme şartları belirlenmiştir.

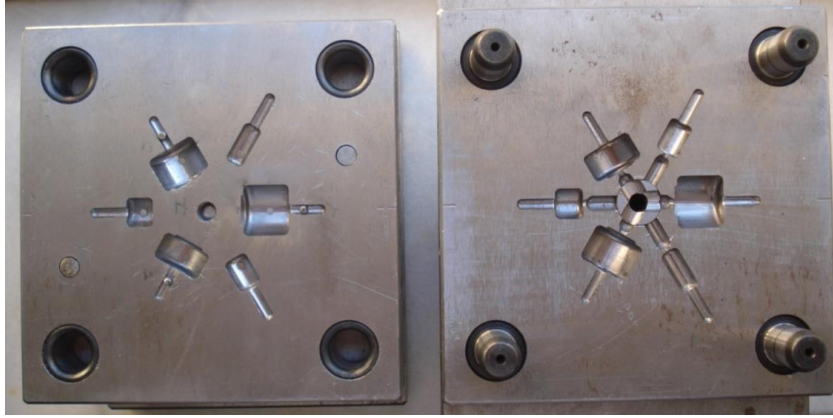
4.2.4. İnsörtlü toz enjeksiyon kalıplama

Enjeksiyon işlemi için ARBURG Allrounder 220S Toz enjeksiyon kalıplama tezgahı kullanılmıştır. İnsört malzemesinin belirlenmesi, sinterleme sıcaklığı, sinterleme süresi, kaplama kalınlığı parametrelerini optimize edebilmek ve mikroyapı analizleri, mekanik testleri yapabilmek için Resim 4.6a daki kalıp kullanılarak Şekil 4.3'deki numune üretilmiştir. Bunun için HSS ve 4340 malzemelerden hazırlanan insörtler kalıp içerisine yerleştirilerek üzerine besleme stoku enjekte edilmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. İnsörtlü toz enjeksiyon kalıplama (İTEK) işlemi

Besleme stoku üretici firmanın tavsiye ettiği değerler (Çizelge 4.7) dikkate alınarak çıkan ürünün durumuna göre optimum enjeksiyon parametreleri belirlenmiştir. Enjeksiyon işleminde kullanılan parametreler Çizelge 4.8'de verilmiştir. Sinterleme parametrelerinin üretilen deney numuneleriyle optimize edilmesinden sonra T kanal çakı imalatı için Resim 4.6b'deki kalıp hazırlanmıştır. 4340 T kanal çakı insörtü Resim 4.6b de görüldüğü gibi kalıp içerisine yerleştirilerek T kanal çakının enjeksiyon işlemi yapılmıştır.

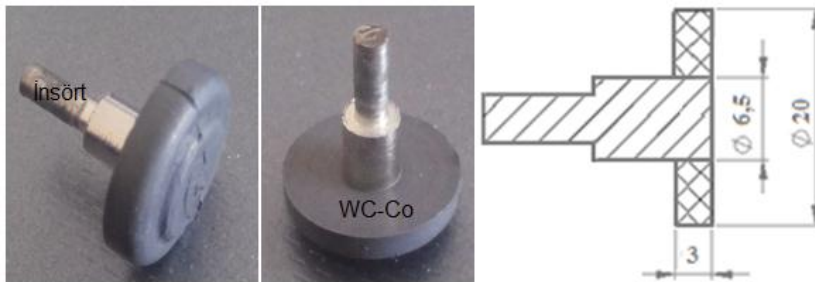


a)



b)

Resim 4.6. Deneylerde kullanılan enjeksiyon kalıpları a) deney numunesi kalıbı, b) T kanal çakı kalıbı



Şekil 4.3. Deney numunesi (ölçü : mm)

Çizelge 4.7. Besleme stoğu üretici firmanın tavsiye ettiği enjeksiyon parametreleri

Enj. Sıcaklığı (°C)	Enj. Basıncı (bar)	Kalıp sıcaklığı (°C)	Geri basınç (bar)	Enj.Zamanı (sn)
188-202	14-138	10-21	0-1.7	0.1-10

Çizelge 4.8. Kullanılan enjeksiyon parametreleri

Enjeksiyon sıcaklığı	Enjeksiyon basıncı	Ütuleme basıncı	Enjeksiyon hızı	Kalıp sıcaklığı
200 °C	300 bar	100 bar	10 ccm/s	60 °C

4.2.5. Kimyasal çözücüyle bağlayıcı giderme işlemi

Bağlayıcı giderme işlemi iki adımda yapılmıştır. Birinci adımda numuneler, etüv fırında 60°C sıcaklıktaki etanol çözeltisinde 48 saat bekletilerek kimyasal bağlayıcı giderme işlemi gerçekleştirilmiştir (Resim 4.7). Kimyasal bağlayıcı giderme işleminin öncesinde ve sonrasında numunelerin kütleleri ölçülerek besleme stoku içerisinde alınan bağlayıcı miktarı tespit edilmiştir. İkinci adımda termal bağlayıcı giderme işlemi yapılmıştır. Isıl bağlayıcı giderme işlemi (ön sinterleme) ise tüp fırınında yüksek saflıktaki (%95 N₂ ve %5 H₂) atmosferi altında sinterleme işlemiyle peş peşe yapılmıştır.



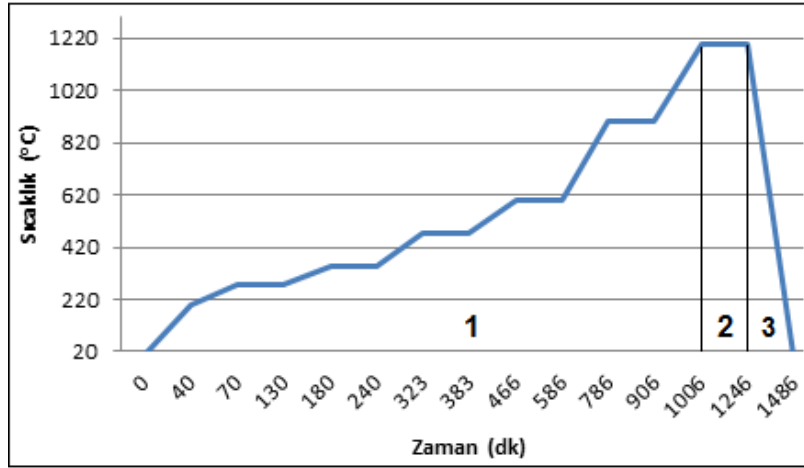
Resim 4.7. Deney numunelerinin çözücüyle bağlayıcı giderme işlemi

4.2.6. Sinterleme işlemi

Sinterleme işlemi, atmosfer kontrollü MTI KSL-1500X marka tüp fırında %95 N₂ ve %5 H₂ karışımı koruyucu atmosfer gazı altında gerçekleştirilmiştir (Resim 4.8a). Sinterleme işlemi Şekil 4.4'te verilen sıcaklık-zaman döngüsüne göre yapılmıştır. Sinterleme döngüsü, TGA analizine göre bağlayıcı kayıplarının olduğu sıcaklıklara dikkat edilerek belirlenen bağlayıcı giderme (1. Bölge), sinterleme (2. Bölge) ve soğuma (3. Bölge) aşamalarını kapsamaktadır. Sinterleme parametrelerinin belirlenmesi deney tasarımı başlığı altında anlatılmıştır. Sinterlenmiş numunelerin resmi Resim 4.8b'de verilmiştir.



Resim 4.8. a) Sinterleme Fırını, b) Sinterlenmiş Numuneler



Şekil 4.4. 1200°C sıcaklıktaki sinterleme için sıcaklık-zaman döngüsü

4.2.7. Sinterleme sonrası boyutsal çekme ve yoğunluk ölçümü

Sinterleme işlemi öncesinde ve sonrasında İTEK yöntemi ile üretilmiş numunelerin boyutları ölçülmüş ve boyut değişimleri tespit edilmiştir. Eşitlik 4.2 kullanılarak % boyutsal çekme hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Çekme} = \frac{b-a}{b} \times 100 \quad (4.2)$$

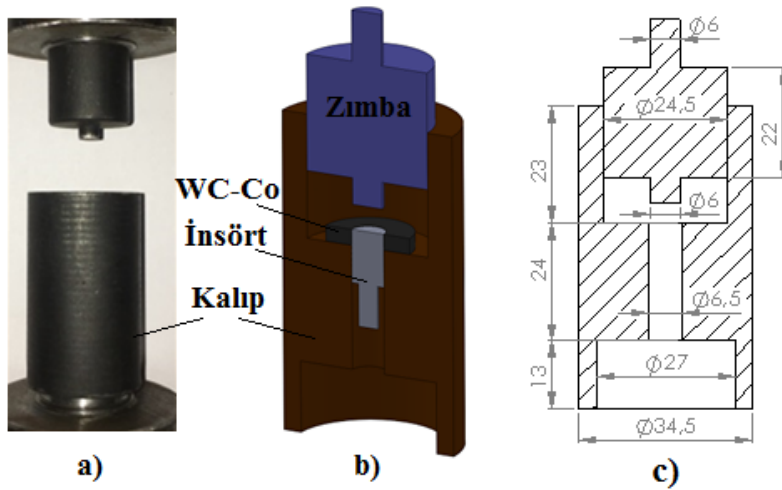
b : Sinterleme öncesi boyut

a : Sinterleme sonrası boyut

Sinterlemeden sonra deney numunesinin yoğunluğunu tespit edebilmek için WC-Co besleme stokundan hazırlanan $\phi 10$ mm yüksekliği 10 mm silindirik şekilde küçük numuneler kullanılmıştır. Sinterlenmiş numunelerin boyutsal çekme ve yoğunluk ölçümleri TS EN 623-2 ve TS 2305 standartları esas alınarak belirlenmiştir (TS EN 1999, TS 2305 1976). Yoğunluk ölçümleri Arşimet prensibinden yararlanılarak yapılmıştır.

4.2.8. Mekanik testler

Mekanik testleri yapmadan önce numunelerin alt kısımları zımparalanarak sertlik ölçme işlemine hazır hale getirilmiştir. Enjekte kısmın ve insörtlerin sinterleme sonrası sertlikleri (HV30) Emco Test Duravision 2000 marka sertlik ölçme cihazıyla 294,2 N yük altında ölçülmüştür. İnsört ve enjekte kısım arasındaki bölgede belli aralıklarla 1,961 N yük altında mikro sertlikleri (HV0.2) ölçülerek ara bölgenin sertlik profili çıkartılmıştır. İnsört ve enjekte bölge arasındaki kesme dayanımını incelemek için Şekil 4.5’de görülen kalıp kullanılarak İTEK yöntemiyle üretilen numunelere kesme deneyi yapılmıştır. Deneyler 50 kN yükleme kapasitesine sahip Instron marka çekme cihazıyla 1 mm/dak sabit hızda TS EN ISO 6892-1 standardına göre yapılmıştır. Ara bölgenin kesme dayanımını bulmak için Eş. 4.5’ten kesilen bölgenin alanı hesaplanmıştır. Sonrasında deneyde ölçülen yük hesaplanan alana bölünerek ara bölgenin kesme dayanımı bulunmuştur (Eş. 4.6).



Şekil 4. 5. Kesme testinde kullanılan kalıp a) resmi, b) kesit görüntüsü

$$A = \pi \times D \times t \quad (4.5)$$

$$\tau = P/A \quad (4.6)$$

A = Kesilen alan (mm²)

D = İnsört çapı (mm)

t = Enjeksiyon kalınlığı (mm)

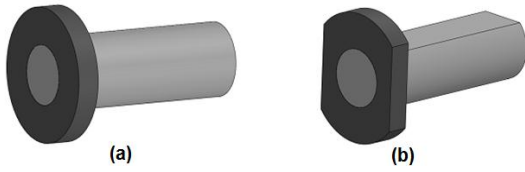
P = Basma testinden elde edilen kuvvet (N)

τ = Ara bölgenin kesme dayanımı (MPa)

Kesme kesti sonrasında kırılan numunelerin kırılma şekilleri incelenerek fotoğrafları çekilmiştir.

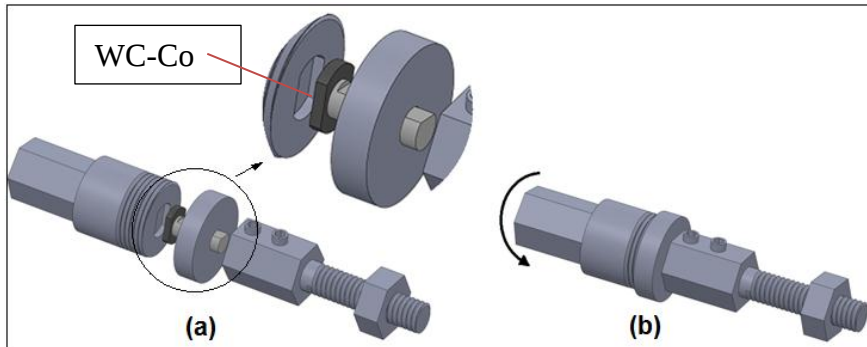
4.2.9. Burulma deneyi

Talaş kaldırma işlemi esnasında takıma etki edecek kuvvetler difüzyon bölgesinde moment oluşturarak burulmaya zorlayacaktır. Difüzyon bağının maksimum hangi büyüklükteki momentleri taşıyacağını gözlemlemek amacıyla burulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Burulma deneyinde kullanılan cihazın motoru 250 Nm yük hücresi 150 Nm kapasiteye sahiptir. Bu deney için insörtlü numuneler enjeksiyon ve sap bölgelerinden Şekil 4.6b’de gösterildiği gibi taşlanmıştır.



Şekil 4.6. a) İnsörtlü numune b) Burulma deneyleri için taşlanmış insörtlü numune

Taşlanmış numuneler birleşme bölgesindeki burulma dayanımını gözlemlemek için tasarlanmış kalıba Şekil 4.7a’da gösterildiği gibi konumlandırılmıştır. Burulma deneyinde numunenin sap kısmı vida ve somunla deney aparatına sabitlenmiş ve enjeksiyon bölgesinin bağlı olduğu taraf döndürülmüştür (Şekil 4.7b).



Şekil 4.7. Burulma dayanımı ölçümü için tasarlanan deney düzeneği a) insörtlü

Numunenin en zayıf kısmı insört ile enjekte kısmın difüzyon ile birleştiği bölge olduğu için kopmalar bu bölgelerde meydana gelmiştir. Kopma gerçekleşmeden önce okunan tork değeri, numunenin burulma dayanımı olarak belirlenmiştir. Kullanılan test cihazı ve aparat Resim 4.9 'da verilmiştir.



Resim 4. 9. Burulma deney cihazı ve deney sonrası kırılmış numunenin kalıp içerisindeki görüntüsü

4.2.10. Mikroyapı analizleri ve element geçişleri

Çalışmada numunelerin mikroyapı analizleri LEICA marka ışık mikroskobu ve JEOL marka JSM-6060LV Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazlarında yapılmıştır. Mikroyapı analizleri aşamasında numuneler 400 ila 1200 numaralı zımparalar ile sırasıyla zımparalandıktan sonra parlatılmış ve ardından %1 nital + saf su ile dağlanarak ışık mikroskobunda ara bölgenin görüntüsü alınmıştır. Ayrıca Ni kaplama banyosunda elektrolitik dağlama yapılarak WC-Co kısmındaki tane yapısı SEM mikroskobunda incelenmiştir.

4.2.11. Deney tasarımı ve ön deneyler

Esas deneylere başlamadan önce difüzyon için daha iyi sonuç verebilecek malzeme ve parametreler ön deneylerle (Çizelge 4.9) belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun için öncelikle HSS ve 4340 insört malzemelerinin WC-(%9)Co besleme stokuyla birlikte sinterleme davranışları ve insört enjekte kısım arasındaki birleşme durumu incelenmiştir. Ön deney şartları literatür araştırması yapılarak belirlenmiştir. Literatürde WC-Co besleme stoku Co oranına bağlı olarak vakumsuz koruyucu atmosfer altında 1300-1600°C arasında ve 60-90 dakika süreyle sinterlendiği belirtilmektedir (Heng ve diğerleri 2013; Eso, Fang ve Griffio, 2005). Ancak İnsört malzemesi dikkate alınarak sinterleme sıcaklığı azaltılmış enjekte

kısmın sinterlenebilirliğini arttırmak için sinterleme süresi uzatılmıştır. Daha sonra HSS ve 4340 malzemelerden yapılan insörtlerin üzeri elektrolitik kaplama yöntemiyle bakır ve nikel kaplanmış ve ara katman kullanımının etkisi araştırılmıştır. Ön deneylerden sonra elde edilen veriler doğrultusunda esas deney tasarımı yapılmıştır.

Çizelge 4.9. Ön deneyler

	İnsört	Ara kaman	Ara katman kalınlığı (μm)	Sint. Sıcaklığı (°C)	Sint. Süresi (dak)
1	HSS	-	-	1300	240
2	HSS	-	-	1250	240
3	HSS	-	-	1200	240
4	4340	-	-	1300	240
5	4340	-	-	1250	240
6	4340	-	-	1200	240
7	HSS	Cu	40	1200	240
8	HSS	Ni	40	1200	240
9	4340	Ni	40	1200	240
10	HSS	Ni	40	1300	240

- Ön deneyler neticesinde HSS ve 4340 malzemelerle WC-%9Co besleme stoku arasında birleşme sağlanabilmesi için ara katman kullanılması gerektiği ortaya çıkmıştır.
- Bakır ara katman sinterleme esnasında sıvı faza geçmektedir bu yüzden deneylere katı hal difüzyonu için nikel ara katman kullanılarak devam edilmiştir.
- Ara katman kalınlığı belirlenirken insört ve enjekte kısmın termal genleşme katsayısı dikkate alınmıştır. Soğuma esnasında arada çatlama olmadan birleşme olması için termal büzülmeyi tolere edebilecek kalınlıkta ara katman kullanılmalıdır. Bunun yanında düşük kaplama kalınlığında ortaya çıkacak sorunlarda bilinmelidir. Bu nedenle ara katman kalınlıkları 25-50-100 μm olarak belirlenmiştir.
- WC-Co besleme stoku Co oranına bağlı olarak 1300-1600°C arasında ve 60-90 dk süreyle sinterlenmektedir (Heng ve diğerleri 2013; Eso, Fang ve Griffio, 2005) Sinterleme sıcaklığını arttırmak yoğunluk, boyutsal çekme ve parça mukavemeti bakımından önemlidir. Ancak insörtlerin termal özellikleri sinterleme sıcaklığını etkilemektedir. Yapılan ön deneylerde 1300 C de HSS insört ergimektedir. Bu yüzden insört malzemelerini karşılaştırmak için sinterleme sıcaklığı 1200 ve 1250 C olarak belirlenmiştir ayrıca 4340 insört kullanılarak 1300 sıcaklıkta da deney yapılmıştır. Sinterleme işlemi literatürden daha düşük sıcaklıklarda yapıldığı için enjekte kısmın daha iyi sinterlenebilmesi amacıyla sinterleme süresi 120-240-360 dakika seçilmiştir.

Ön deneyler neticesinde elde edilen verilere göre deney tasarımı yapılmıştır (Çizelge 4.10).

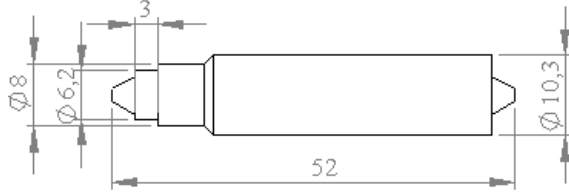
Çizelge 4.10. Deney tasarımı

İnsört	Ara katman	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Ara katman kalınlığı (µm)	Sinterleme Süresi (dak)	Deney No
HSS	Ni	1200	25	120	1
			25	240	2
			25	360	3
			50	120	4
			50	240	5
			50	360	6
			100	120	7
			100	240	8
			100	360	9
		1250	25	120	10
			25	240	11
			25	360	12
			50	120	13
			50	240	14
			50	360	15
			100	120	16
			100	240	17
			100	360	18
		1300	100	120	19
4340	Ni	1200	25	120	20
			25	240	21
			25	360	22
			50	120	23
			50	240	24
			50	360	25
			100	120	26
			100	240	27
			100	360	28
		1250	25	120	29
			25	240	30
			25	360	31
			50	120	32
			50	240	33
			50	360	34
			100	120	35
			100	240	36
			100	360	37
		1300	100	240	38

4.2.12. İTEK yöntemi ile T-kanal frezeleme takımının imalatı

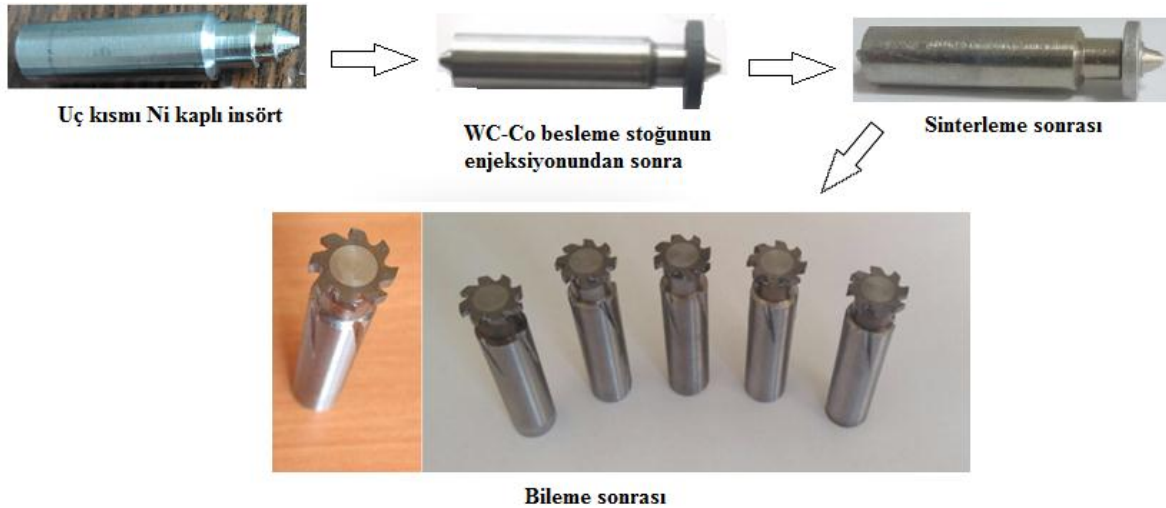
Yapılan deneylerle ara bölgenin mukavemeti bakımından optimum parametreler belirlendikten sonra İTEK yöntemiyle T kanal çıkısının imalatı yapılmıştır. HSS insört

1300 °C’de sinterleme esnasında eridiği için 4340 malzeme çakı insörtü olarak kullanılmıştır (Şekil 8.8). 4340 insörtün 6,2 mm’lik çap kısmına elektrolitik kaplama yöntemiyle 100 µm Ni kaplandıktan sonra insört Resim 4.6’daki kalıp içerisine yerleştirilerek yine 6,2 mm çap üzerine WC-%9Co besleme stoku enjekte edilmiştir.



Şekil 4.8. T kanal çakı insörtü (ölçü: mm)

Enjeksiyon işleminden sonra parçalar 60 °C sıcaklıkta 48 saat etanol sıvısı içerisinde bekletilerek besleme stokuna bağlayıcı giderme işlemi uygulanmıştır. Ön-deneylerde belirlenen termal bağlayıcı giderme (ön-sinterleme) şartları ve 1300 °C sıcaklıkta 240 dakika bekletilerek sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Takımın üretilmesi için gerçekleştirilen son adımda, sinterleme sonucu elde edilen numuneler Karcan Firması’na gönderilmiştir. Burada numunelere bileme ve h6 toleransında taşlama işlemleri uygulanmıştır. Böylece T-kanal frezeleme takımının imalat süreci tamamlanmıştır. Bu aşamalar Resim 4.10’da gösterilmiştir.

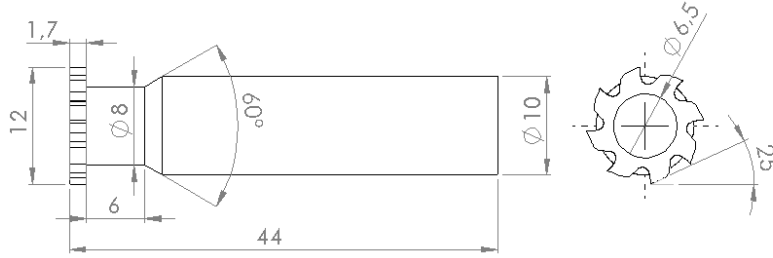


Resim 4.10. İTEK T kanal çakısının üretim aşaması

4.2.13. İTEK T kanal çakı ve yekpare karbür T kanal çakının bilenmesi

Çalışmalara başlarken savunma sanayide kullanılan yekpare karbür T-kanal freze çakısı yerine sap kısmı çelik, kesen kısmı karbür olan T kanal çakısını İTEK yöntemiyle üreterek

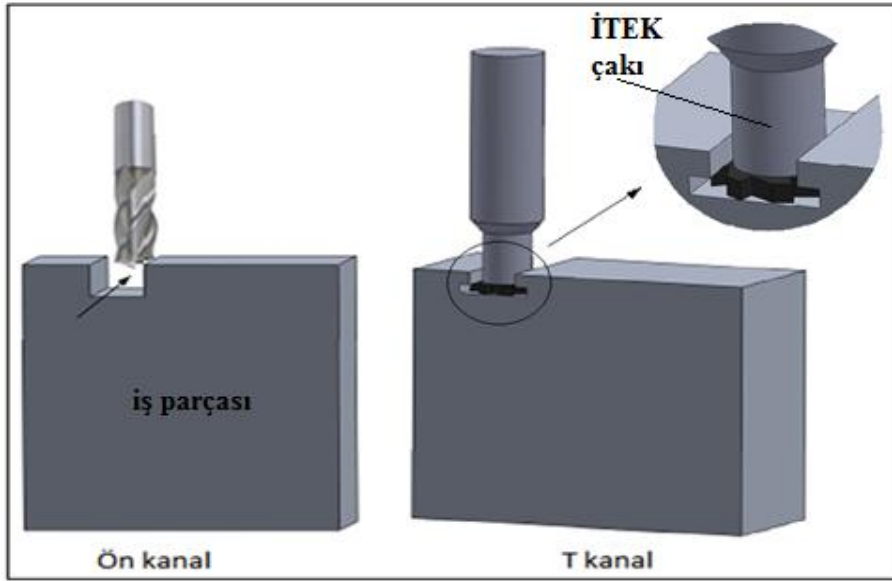
tokluğu artırmak için yola çıkılmıştır. Çakı için üretilen parçaların sinterleme işleminden sonra parçalar Karcan firmasına gönderilerek T kanal çakısı haline getirilmiştir (Şekil 4.9). İTEK T kanal çakısının bilenmesinden sonra performans karşılaştırması yapabilmek amacıyla Karcan firması Avusturya'daki Ceratizit firmasından ekstrüzyonla üretilmiş WC çubuk malzemeyi temin ederek taşlama ve bileme işlemlerini yapıp İTEK T kanal çakısıyla aynı aç ve geometriye sahip yekpare karbür T kanal çakısının da üretimini yapmıştır.



Şekil 4.9. T kanal çakının ölçüleri (mm)

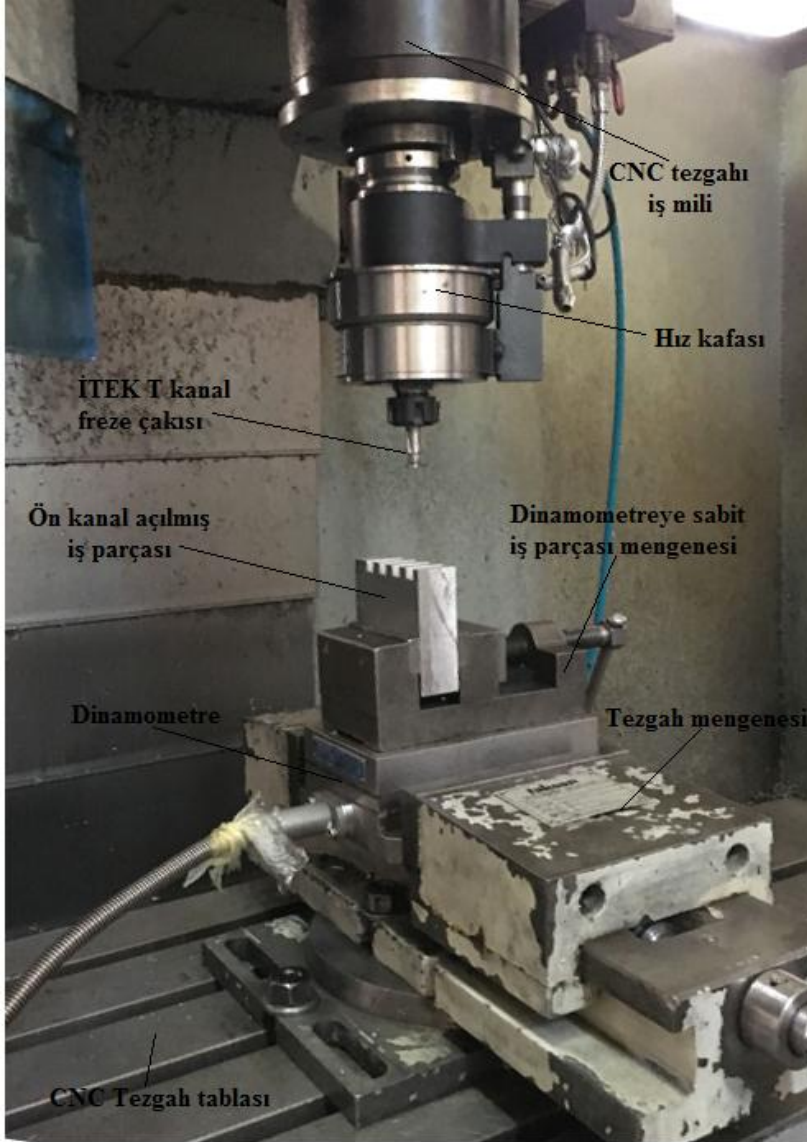
4.2.14. İTEK yöntemiyle geliştirilen T-kanal çakı ile yekpare karbür T-kanal çakının performanslarının karşılaştırılması

İşleme performans deneylerinde Al 7075 T6 malzeme kullanılmıştır. Kesme şartları takım üretici firmanın ve bu takımı kullanan imalatçıların önerileri doğrultusunda belirlenerek 4 farklı kesme hızı (200, 300, 400, 500 m/dak) üç farklı ilerleme (0,01-0,025-0,05 mm/diş) seçilmiştir. Kesme derinliği T kanal frezeyle bağlı olarak sabit (1,7 mm) kalmıştır. Deneyler JOHNFORD VMC-550 CNC dik işleme merkezinde kuru kesme şartlarında yapılmıştır. Üretilen çakının çapı 12 mm olması nedeniyle yüksek kesme hızlarına çıkabilmek için tezgah devrini 4,8 kat arttıran hız kafası kullanılmıştır. Kesme deneyleri için T-kanal freze çakısının sap ölçüsü dikkate alınarak parmak frezeyle ön kanal boşaltma işlemi yapılmış ve ardından T-kanal açılmıştır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Ön kanal ve T kanal açma işlemi

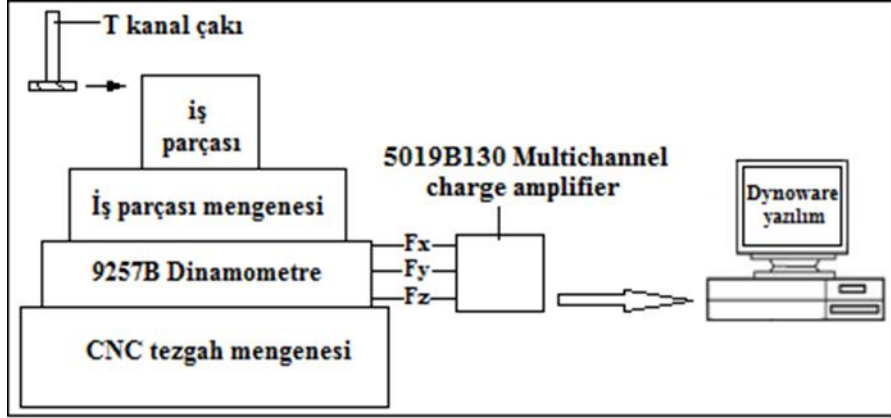
Al 7075 T6 malzeme üzerinde İTEK yöntemiyle üretilen T-kanal freze çakısıyla 12, yekpare karbür takımla 12 olmak üzere toplam 24 işleme deneyi yapılmıştır. İşleme deneylerinde kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülükleri ölçülerek takım performansları karşılaştırılmıştır. Deney düzeneği Resim 4.11’de verilmiştir.



Resim 4.11. Performans testleri için hazırlanan deney düzeneği

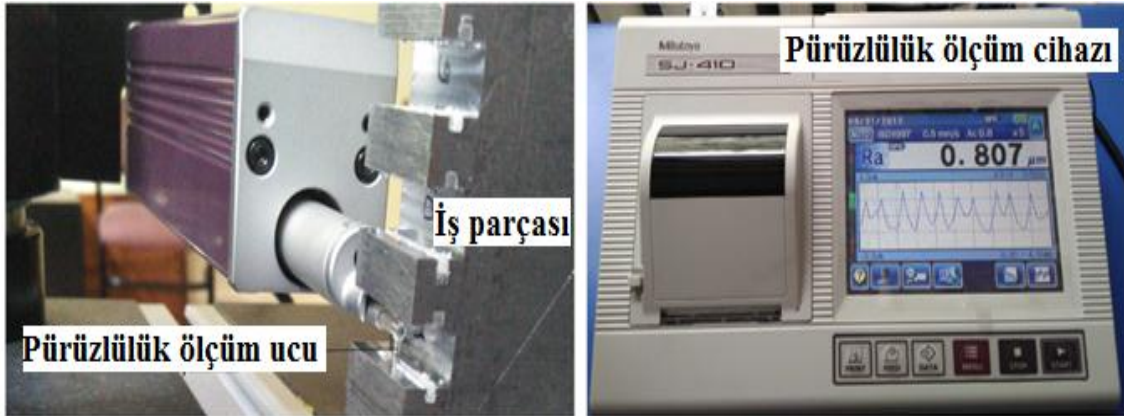
Kesme işlemleri esnasında oluşan kuvvetleri (F_x , F_y , F_z) ölçebilmek için KISTLER 9257B, 3 bileşenli piezo-elektrik dinamometre kullanılmıştır. Dinamometre KISTLER Type 5019 sinyal yükselticiye bağlanarak veriler ara kablo vasıtasıyla bilgisayara aktarılmıştır (Şekil 4.11). Aktarılan veriler “DynoWare Type 2825A1-2” programı ile grafiklere dönüştürülmüştür. Elde edilen grafiklerden F_x , F_y , F_z eksenlerinde oluşan ortalama kesme kuvvetleri elde edilmiştir. Eş. 4.7 kullanılarak bileşke kesme kuvveti hesaplanmıştır.

$$Fr = \sqrt{Fx^2 + Fy^2 + Fz^2} \quad (4.7)$$



Şekil 4. 11. Kesme kuvvetlerinin ölçümü

Yüzey pürüzlülüğü ölçümü için “Mitutoyo SJ 410” yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı (Resim 4.12) kullanılmıştır. Açılan T kanalın üç farklı bölgesinden ölçüm yapılmıştır. Ölçülen pürüzlülük değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) hesaplanmıştır.



Resim 4.12. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Deneyleerde elde edilen sonuçlar aşağıda verilen başlıklar altında incelenmiştir.

- Ön deneylerde elde edilen sonuçlar
- Sinterleme öncesi nikel kaplamanın incelenmesi
- TGA, enjeksiyon ve bağlayıcı giderme işlemleri
- Sinterleme sıcaklığının ve süresinin etkisi
- Sinterleme sonrası yoğunluk
- Sinterleme sonrası sertlik
- Element difüzyonu
- Ara bölgedeki mikro yapı
- WC-Co/insört ara bölgenin incelenmesi
- Birleşme bölgesinin kesme mukavemeti
- Birleşme bölgesinin burulma dayanımı
- Takım performanslarının incelenmesi
- Yekpare karbür T kanal çakısıyla İTEK T kanal çakısının malzeme ve işçilik bakımından karşılaştırılması

5.1. Ön Deneylerde Elde Edilen Sonuçlar

İTEK yöntemiyle çelik ve WC-Co malzemelerden parça üretimi için aşağıdaki belirtilen konular araştırılarak ön deneyler yapılmıştır.

- Ara katmansız olarak WC-Co/HSS parça üretimi
- Ara katmansız olarak WC-Co/4340 parça üretimi
- Ara katman kullanımı

5.1.1. Ara katmansız olarak WC-Co/HSS parça üretimi

HSS insört kullanılarak üretilen numuneler 1200, 1250 ve 1300 °C sıcaklıklarda 240 dakika sinterleme sonrası incelenmiştir. 1300 °C sıcaklıkta HSS insört yüzeyinde ergime meydana gelmektedir (Resim 9.1a). 1250 ve 1200 C sıcaklıkta ise HSS insört ve enjekte bölge arasında birleşme sağlanamamış ve ara bölgede boşluk oluşmuştur (Resim 9.1b). Hatta sinterleme sonrası insört enjekte kısmın içerisinde kolay bir şekilde hareket

edebilmekte ve çıkartılabilmektedir. Aynı şartlarda 3 numune daha sinterlenerek deney tekrarlanmış fakat yine aynı sonuç ortaya çıkmıştır.

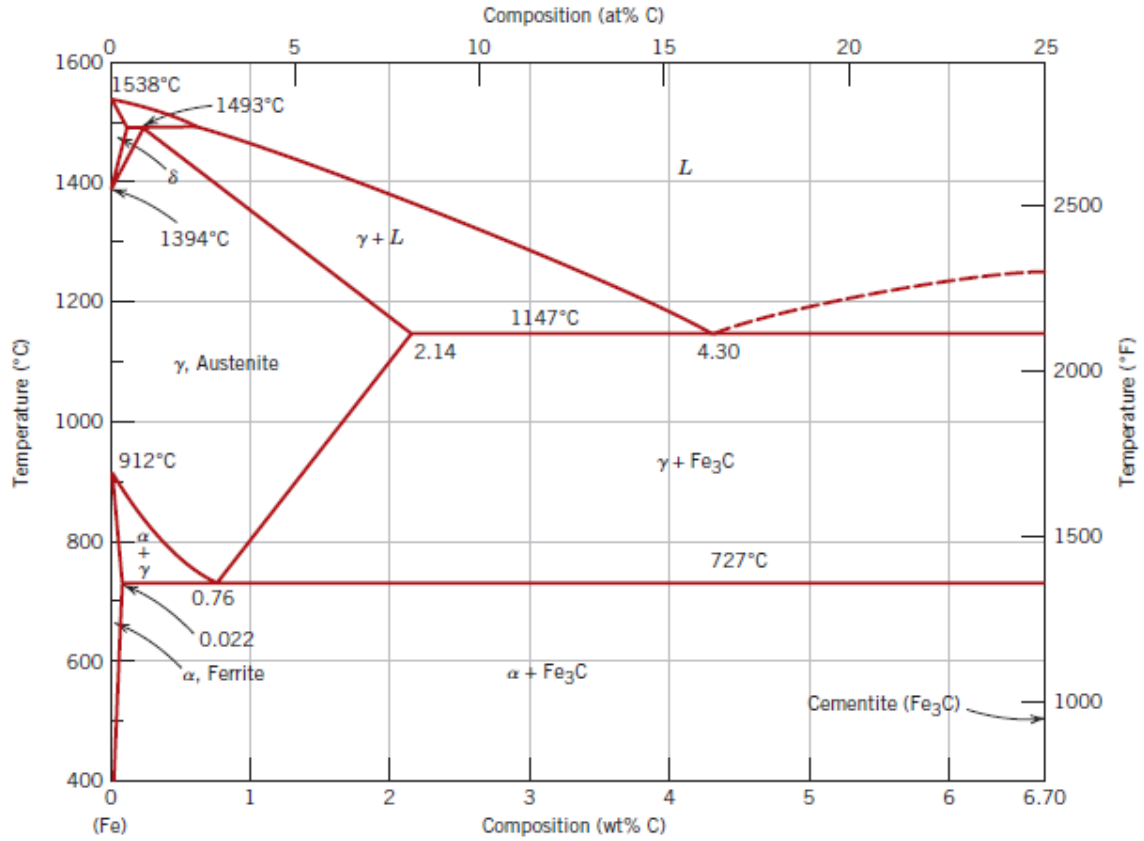


a)

b)

Resim 5.1. Ön deneylerde sinterlenen HSS/WC-Co numuneler a)1300 °C’de sinterlenen
b) 1250 °C’de sinterlenen

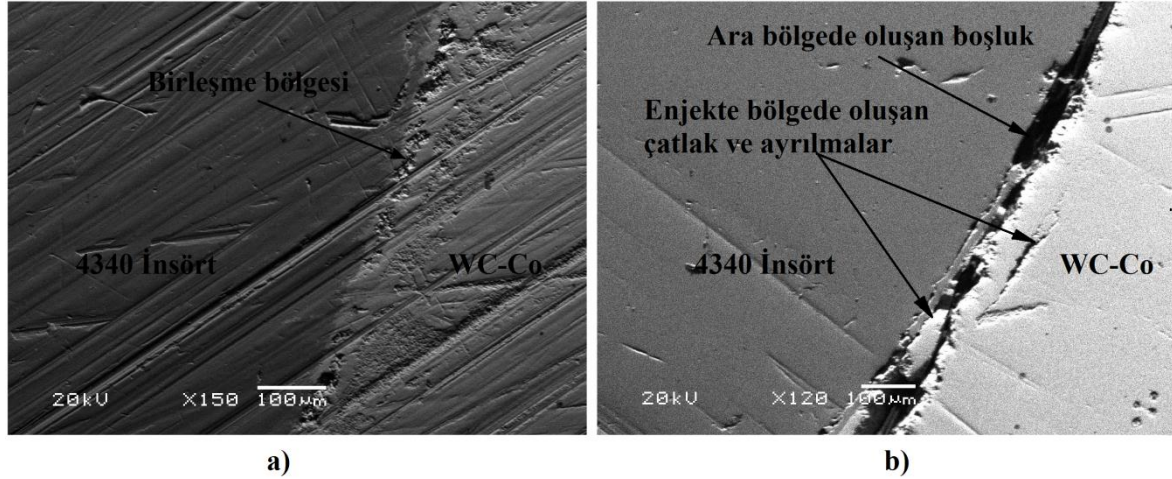
İnsört yüzeyinde meydana gelen ergime, WC-Co tarafından HSS yüzeyine difüzyon olan Co ve C atomlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. İnsörtlü toz enjeksiyon kalıplama yöntemiyle elde edilen parça sinterlenirken kimyasal içeriklerine bağlı olarak insört ve besleme stoku arasında element geçişleri meydana gelmektedir. WC-Co-C sisteminde, WC tozlarının yüzeyinden çözünen C elementi, atom çapı küçük olduğu için kolay bir şekilde difüzyon olabilmekte [Guo, Koopman, Fang, Wang, Fan ve Rowe 2013; Callister 2007) ve farklı fazların oluşmasını etkilemektedir (Petersson 2004). WC-Co ve 316L paslanmaz çelik besleme stokları kullanılarak TEK ko-enjeksiyon yöntemiyle parça üretimi için yapılan çalışmada Fe_3W_3C , Co_3W_3C ve $(Cr,Fe)_7C_3$ gibi karbür fazlarının oluştuğu ve C ve Co ın demir alaşımı içerisinde çözünerek hem WC-Co hem de 316L nin sinterleme sıcaklıklarından daha düşük sıcaklıkta sıvı faz oluşmasına neden olduğu belirtilmektedir (Simchi ve Petzoldt 2004). Yapılan çalışmada WC-Co içerisinde ki C (%5,54) ve Co (%9) oranı M2 HSS malzeme içerisindeki C (%0,9) ve Co(%) oranından yüksektir. Bu yüzden difüzyon yönü yüksek konsantrasyonlu bölgeden düşük konsantrasyonlu bölgeye doğru olmaktadır (Kurt 1996). Demir karbon denge diyagramı incelendiğinde C oranının artığında ergime sıcaklığının düştüğü görülmektedir (Şekil 5.1). Bu nedenle HSS insört yüzeyindeki C oranının artmasıyla ve sıvı faza geçen Co’ın etkisiyle HSS insört yüzeyinde sıvı faz oluşum sıcaklığı düşmekte ve ergimeler meydana gelmektedir.



Şekil 5.1. Fe-Fe₃C denge diyagramı

5.1.2. Ara katmansız olarak WC-Co/4340 parça üretimi

HSS insört kullanımının araştırılmasından sonra, insört ve WC-Co arasında difüzyon oranını arttırabilecek içeriğe sahip ve yüksek sıcaklığa dayanabilecek insört malzemeleri için literatür araştırması yapılmıştır. Bunun neticesinde içerisinde nikel olan 4340 malzeme insört olarak kullanılmaya karar verilmiştir. Nikelin Fe ve Co içerisinde katı çözünürlüğü yüksektir (Prince ve Okamoto 1995; Fernandes ve Seno 2011). Bu nedenle 4340 insört kullanımıyla insört/WC-Co arasında difüzyon oranının arttırılarak birleşme sağlanması amaçlanmıştır. 4340 malzemedan insörtler hazırlanarak üzerine WC-Co besleme stoku enjekte edilmiştir. Numuneler 1200 °C, 1250 °C ve 1300 °C sıcaklıkta 240 dakika sinterlenmiştir. Sinterleme sonunda gözle muayene edildiğinde insört ve enjekte kısımda herhangi bir kusur olmadığı ve insörtün enjekte kısım içerisinde oynamadığı görülmüştür. Ara bölgeyi daha detaylı incelemek için numune zımparalanarak SEM görüntüleri alınmıştır. Görüntüler incelendiğinde 4340 insört ve WC-Co arasında bazı bölgede birleşme olduğu (Şekil 5.2a) diğer kısımlarda ise boşluk ve çatlamlar (Şekil 5.2b) ortaya çıktığı görülmüştür.



Şekil 5.2. 1300 C sinterleme sonrası 4340 insört/ WC-Co ara bölge a) birleşen kısmı, b) çatlak oluşan kısmı

4340 insörtle üretilen numunelerde 1300 °C sinterlemeden sonra insört yüzeyinde ergime olmadığı gözlenmiştir. 1300 °C sinterleme sıcaklığında 4340 insört yüzeyinde ergime olmaması C (% 0,39) oranının HSS'nin karbon oranından daha düşük olmasıyla açıklanabilir. Demir karbon denge diyagramında, C oranının artmasıyla bileşimine göre çelik malzemelerin ergime sıcaklığı azalmaktadır (Barrena ve diğerleri 2010). Buna göre C oranı daha düşük olduğu için 4340 insört yüzeyinde ergime olmamaktadır. Sinterleme esnasında ergime olmadığından dolayı insört boyutunu korumakta ve WC-4340 ara yüzeyinde birleşme sağlanabilmektedir. SEM görüntülerinde insört çevresinde bir bölgenin birleştiği ancak diğer kısımlarda çatlamlar ve ayrılmalar meydana geldiği görülmüştür (Şekil 9.1). Meydana gelen çatlaklar ve ayrılmalar 4340 ($\alpha=11,1-13,9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 100 - 500 °C arasında) insörtle (Earle M. J. Co. 2007) WC-Co'nun ($\alpha=5,5-7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, Co %6-%16, 100 - 500 °C) (Wang ve diğerleri 2015) arasında termal genleşme katsayılarının farklı olmasından dolayı soğuma esnasında ortaya çıkmaktadır (He ve Evans 1991; Gou ve diğerleri 2015). Sinterlemede 1300 C sıcaklıkta 240 dakika süre sonunda numune soğumaya başlamaktadır. İç kısımda ki 4340 insörtün termal genleşmesi daha büyük olduğu için enjekte kısımdan daha fazla küçülmekte ve bundan dolayı WC-Co ile 4340 insört arasında oluşan gerilmeler çatlama ve ayrılmaya neden olmaktadır.

WC-Co besleme stoku ve 4340 insörtle direkt olarak üretilen numunenin ara bölgesindeki dayanımı ölçmek için Şekil 8.5'te görülen kalıp kullanılarak kesme deneyi yapılmıştır. Deneyde ölçülen 4,28 kN basma yükü Eş. 8.5 ve 8.6 kullanılarak kesilen alana bölündüğünde, ara bölgede 83,92 N/mm² kesme dayanımı elde edildiği görülmüştür.

Seramik malzemeler fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı metallerle birleştirilmesi zordur. Birleştirilecek olan metal ve seramik malzemelerin mekanik, kimyasal ve ısısal olarak uyumlu olması gerekmektedir (Akkoca 1994). Birbirleriyle yakın uyum içerisinde olan seramik ve metal malzemeler direkt olarak bazı bağlanma mekanizmalarıyla birleştirilebilirler. Ancak çoğu seramik malzemeler metal malzemelerle direkt olarak birleştirilmek istendiğinde seramik malzemelerin özelliklerinden dolayı ara kesitte açıklık kalabilir ve yeterli kesme dayanımı elde edilemeyebilir. Bununla birlikte seramik ve metal malzemelerin termal genleşme katsayılarının farklı olmasından dolayı malzemeler soğurken farklı oranda daraldığı için ara kesitte kalıntı gerilmeler ve mikro çatlaklar oluşabilir. Bu durumda metal ve seramik malzemelerin özelliklerine uygun ve üretim tekniği için uygulanabilir bazı yöntemler geliştirilebilir. Genel olarak bütün yöntemlerde seramiğe birleştirilecek olan metal malzemenin seramiği ısılatması gerektiği ve bununla birleşme yüzeyi boyunca açıklık kalmadan birleşmenin sağlanabileceği belirtilmektedir (Zhang ve diğerleri 2002; Değer 1994). Daha sağlam birleştirme elde edebilmek için seramik tarafına da element geçişleri olmalıdır. Fakat seramik ve metal malzemeyi direkt olarak birleştirmede bu mümkün olmayabilir. Bu durumda iki malzeme ortasında eğrime sıcaklığı her iki malzeme için de uygun olan bir ara katman kullanılması, metal tarafına difüzyon seramik tarafına infiltrasyon sağlayarak bağ dayanımının artırılmasına yardımcı olur (Aydın 2008). Bu nedenle sinterleme esnasında insört ve WC-Co malzemeleri daha iyi birleştirebilmek için ara katman kullanımına karar verilmiştir.

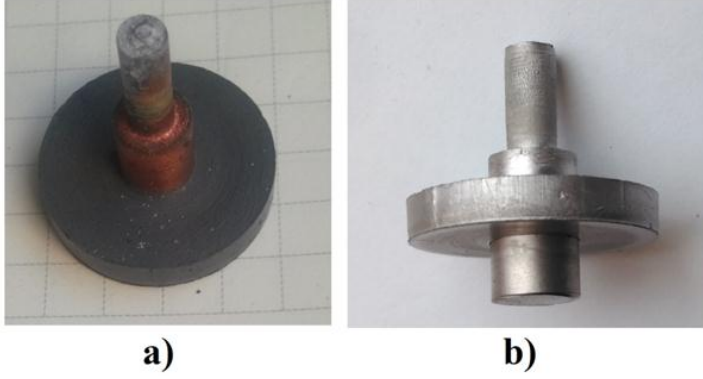
5.1.3. Ara katman kullanımı

HSS ve 4340 insörtler ve WC-Co besleme stokuyla ara katmansız olarak parça üretildiğinde olumlu sonuçlar alınamadığı için insört ve enjekte bölge arasında ortaya çıkan hataları azaltmak ve birleşme sağlayabilmek amacıyla ara katman kullanımına karar verilmiştir. Çizelge 4.4'te yer alan bilgilere göre insört ve besleme stokuna yakın özelliklere sahip bakır ve nikel malzemeler ara katman olarak kullanılmıştır.

HSS insört ve Cu ara katman kullanımı

Bakır ara katman kullanımını araştırmak için HSS insörtler hazırlanmış ve elektrolitik kaplama yöntemiyle üzerine 40 µm bakır kaplanmıştır. Ardından insört üzerine WC-Co besleme stokunun enjeksiyonu yapılmıştır. Numuneye bağlayıcı giderme işlemleri

yapıldıktan sonra (Resim 5.2a) numune 1200 °C sıcaklıkta 240 dakika sinterlenmiştir. Sinterleme sonrası bakır kaplanmış numunelerin gözle muayenesinde bakırın eriyip aktığı, enjekte bölgesinin yerinden kaydığı ve bununla birlikte birleşmenin sağlanamadığı gözlemlenmiştir (Resim 5.2b).



Resim 5.2. Bakır ara katman kullanımı a) bağlayıcı giderme işlemi sonrası, b) Sinterleme sonrası

HSS insört ve Ni ara katman kullanımı

Bakır ara katman kullanılan deneyde, birleştirme bakımından olumsuz sonuçlar alındığı için katı hal birleştirme için ergime sıcaklığı daha yüksek olan nikel ara katman kullanılarak deneylere devam edilmiştir. HSS insörtlerin üzerine elektrolitik kaplamayla 40 µm Ni ara katman uygulanmış ve WC-Co besleme stoku enjekte edilmiştir. Bağlayıcı giderme işlemleri yapılarak numune 1300 C de 240 dakika sinterlenmiştir. Sinterleme işleminin sonucunda HSS insörtün eridiği görülmüştür (Resim 5.3).



Resim 5.3. 1300°C de sinterlenen numuneler

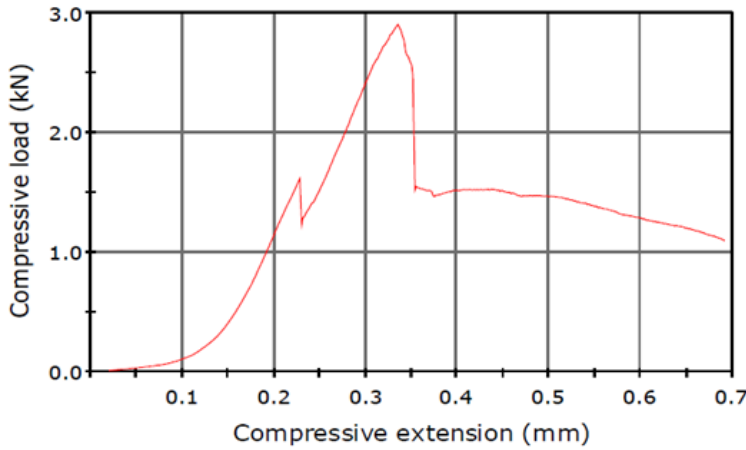
Sinterleme sıcaklığını arttırmak yoğunluk, boyutsal çekme ve parça mukavemeti bakımından önemlidir. Ancak HSS insörtün termal özellikleri sinterleme sıcaklığını etkilemektedir. Bu yüzden HSS insört kullanılarak kalıplanan parçalar WC-Co için literatürde belirtilen sıcaklık değerlerinden daha düşük sıcaklıkta sinterlenmiştir. Buna rağmen 1300 °C de yapılan sinterleme işleminde HSS insört üzerinde ergime meydana geldiği ve ara bölgede birleşme olmadığı görülmüştür. Ara katmansız olarak HSS insörtle parça üretimi için yapılan deneylerde olduğu gibi HSS insörtün yüzeyi Ni ile kaplanınca da ergime meydana gelmektedir. Ni ara katman kullanılarak 1300 °C’de yapılan sinterleme de insörtte ergime olmasında HSS’nin C oranının yüksek olmasının yanında Ni katmanın da etkili olduğu düşünülmektedir. Ni ara katman kullanarak WC-Co ve 316L paslanmaz çelik besleme stoklarından ko-enjeksiyonla üretilen parçanın sinterleme davranışlarının araştırılmasında, Ni katmanın ara yüzeyde sıvı film oluşturduğu ve bunundan dolayı ara bölgedeki yapının ergime sıcaklığının da düştüğü belirtilmektedir (Simchi ve Petzoldt 2010). Bununla birlikte Fe-Ni-Co-W-C faz diyagramınınnda ergime sıcaklığının, bağlayıcı kompozisyonuna ve ağırlıkça yüzdesine bağlı olarak 1200 °C ile 1300 °C arasında değiştiğini belirtmektedir (Uhrenius ve diğerleri 1997).

1300 C de Ni kaplı HSS insört yüzeyinde ergime meydana geldiği için sinterleme sıcaklığı düşürülerek ön deneylere devam edilmiştir. Tekrar HSS insörtler hazırlanarak üzeri 40 µm Ni kaplanmış ve WC besleme stoku enjeksiyonu yapılmıştır. Numune 1200 °C’de 240 dakika sinterlenmiştir. 1200 °C’de yapılan sinterleme sonunda gözle yapılan muayenede ara bölgede ayrılma veya herhangi bir kusur olmadığı görülmüştür. Ara bölgeyi daha iyi inceleyebilmek için numune zımparalanarak SEM mikroskopunda birleşme bölgesinin görüntüleri alınmıştır (Şekil 5.3). SEM görüntüleri incelendiğinde Ni ara katman kullanılarak HSS insört ve WC-Co arasında birleşme sağlanabileceği görülmüştür.



Şekil 5.3. Ni ara katman ve HSS insört kullanılarak üretilen numunenin ara bölgesi (1200 °C 240 dakika sinterleme)

HSS insört ve Ni ara katman kullanılarak üretilen numunenin ara bölgesindeki dayanımı ölçmek amacıyla kesme testi yapılmıştır. Kesme deneyinde 2,9 kN basma yükü (Şekil 5.4) ve dolayısıyla 56,8 N/mm² kesme dayanımı elde edilmiştir.



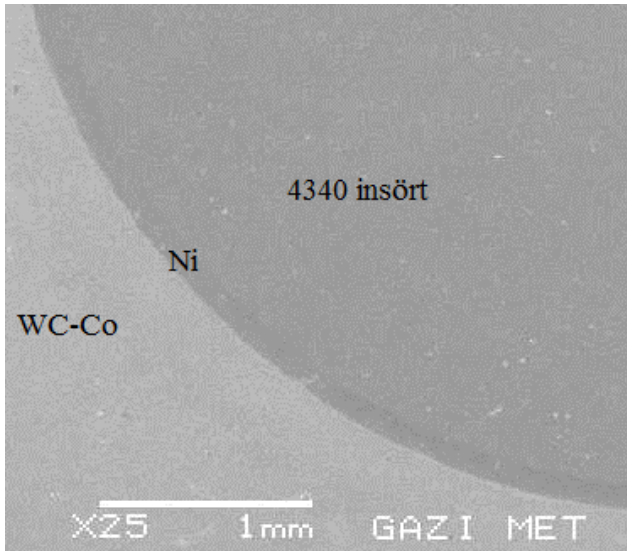
Şekil 5.4. HSS /Ni/WC-Co numunenin kesme deneyinde oluşan yük grafiği

Nikel ara katman kullanımı ara bölgede birleştirmeyi sağlamakta ve ara bölgenin mukavemetini arttırmaktadır. HSS insörtle direkt olarak WC-Co parça üretimi için yapılan bütün deneylerde insört ve besleme stoku arasında birleşme sağlanamazken nikel ara katman kullanılarak 1200 °C’de sinterlenen numunelerde birleşme elde edilebilmiştir.

4340 insört ve Ni ara katman kullanımı

İnsört ve WC-Co besleme stokuyla ara katmansız parça üretiminde 4340 insört HSS ye göre daha iyi sonuç vermiş ve 4340 insört ve WC-Co arasında bölgesel olarak birleşme

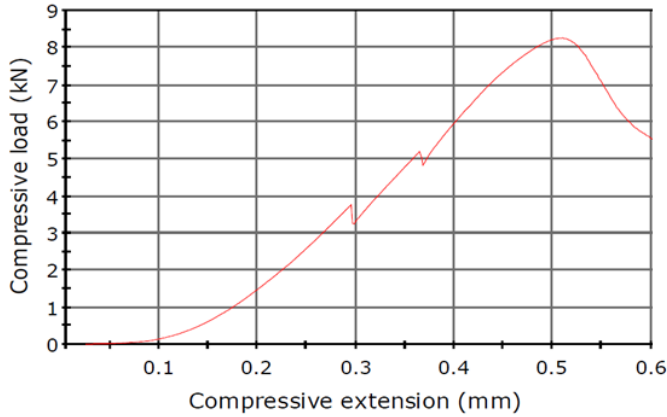
sağlanmıştır. Ancak ara bölgede çatlaklar ve ayrılmalar meydana gelmektedir. 4340 insört ve WC-Co arasında oluşan bu hatalar Ni ara katman kullanılarak azaltılmaya çalışılmıştır. 4340 malzemeden yapılan insörtlerin üzeri 40 µm Ni kaplanmış besleme stoku enjekte edilerek bağlayıcı giderme işleminin ardından numune sinterlenmiştir. Sinterleme sonrası ara bölge incelenmiş ve kesme deneyi yapılarak Ni ara katmanlı ve katmansız 4340 insört kullanılarak üretilen numunelerin ara bölgelerinin kesme dayanımları karşılaştırılmıştır. Ni ara katmanlı 4340 insörtle üretilen numune incelendiğinde WC-Co ve insört arasında birleşme sağlandığı ve ara bölgede oluşan çatlakların ve ayrılmaların ara katmansız numuneye göre önemli ölçüde azaldığı görülmüştür (Şekil 5.5). Ni ara katman kullanımı ara bölgede oluşan hataları önemli ölçüde azaltmaktadır.



Şekil 5.5. 50 µm Ni ara katman ve 4340 insört kullanılarak üretilen numunenin ara bölgesi (1300 °C de 240 dakika sinterleme)

Metal ve seramik malzemelerden parça üretiminde veya metal-seramik birleştirmelerde ortaya çıkan kılcal çatlaklar ve buna benzer problemler genel olarak iki malzeme arasındaki termal genleşme farkından kaynaklanmaktadır. WC-Co ve çeliği difüzyon kaynağıyla birleştirmek için yapılan çalışmalarda birleştirme sonrası ara bölgede kalıntı gerilmeler oluştuğu ve nikel ara katman kullanımıyla kalıntı gerilmelerin azaltılarak ara bölgenin kesme dayanımının arttığı belirtilmektedir (Chen ve diğerleri 2013). Yapılan çalışmada buna benzer olarak ara bölgede oluşan hatalar azalmıştır. Ara bölgedeki hataların azaldığı ve dayanımının arttığı kesme deneyinden de anlaşılmaktadır. Şekil 5.6'da 40 µm Ni ara katman ve 4340 insört kullanılarak WC-Co besleme stokuyla 1300 °C'de 240 dakika sinterlenerek üretilen numuneye yapılan kesme deneyinde 8.3 kN basma yükü elde edildiği

görülmektedir. Numunenin kesme dayanımı $162,7 \text{ N/mm}^2$ olarak hesaplanmıştır (Eş 4.5 ve 4.6). 4340 insörtle ara katmansız olarak üretilen numunenin kesme dayanımı ($83,92 \text{ N/mm}^2$) ara bölgede Ni ara katman kullanılarak üretilen numunenin kesme dayanımı ($162,7 \text{ N/mm}^2$) karşılaştırıldığında aynı sinterleme şartlarına sahip olmasına rağmen $40 \mu\text{m}$ Ni ara katman kullanımıyla kesme dayanımının yaklaşık olarak 2 kat arttığı görülmüştür.



Şekil 5.6. 4340/Ni/WC-Co numunenin kesme deneyinde oluşan yük grafiği

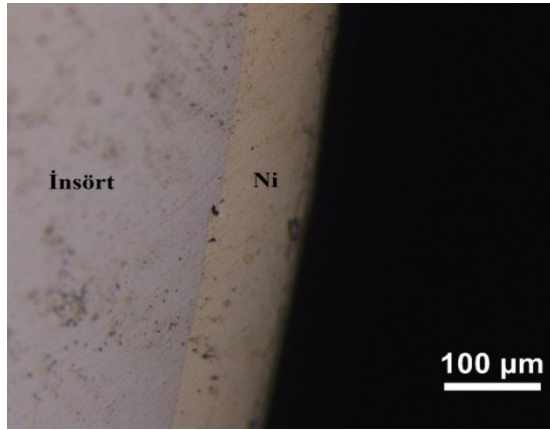
5.2. Sinterleme Öncesi Nikel Kaplamanın İncelenmesi

Deneylerde kullanılacak insörtler kaplanmadan önce kaplama parametrelerine bağlı olarak kaplama kalınlığının optimizasyonu yapılmış ve ara katman uygulaması için yapılan elektrolitik kaplama sistemin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Kaplama sonrası kaplama kalınlıkları X-ray ölçme cihazında ölçülmüş ve istenilen kalınlıkta oldukları tespit edilmiştir. Yapılan kaplama sistemiyle istenilen şartlar sağlanarak kaplama banyosu üretici firmanın belirttiği sürede ve kalınlıkta kaplama yapılabilmektedir (Resim 5.4).



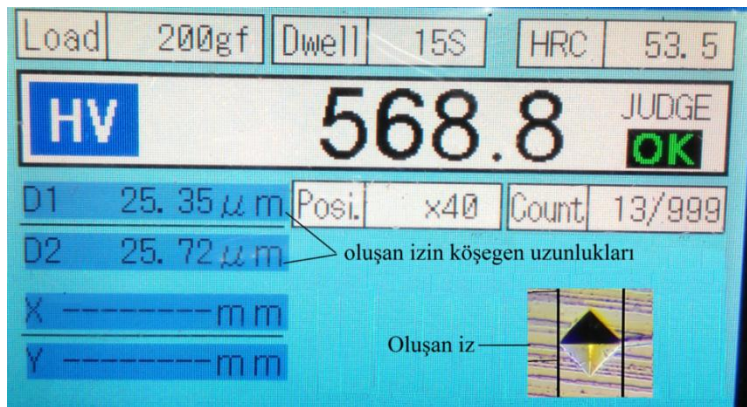
Resim 5.4. Kaplama sisteminin optimizasyonunda kullanılan numuneler

Ara katman İTEK yönteminde insört ve enjekte bölge arasında difüzyonu artırmak ve daha mukavemetli birleşme sağlamak için kullanılmıştır. Kaplama ve insört arasında ayrılma ve çatlama gibi hatalar sinterleme esnasında birleştirmeye olumsuz etki edebilir. Bu nedenle kaplama işleminden sonra numunelerin alın kısmı zımparalanarak insört/kaplama ara bölgesi optik mikroskopta incelendiğinde ayrılma, çatlama ve gözenek gibi hataların olmadığı görülmüştür (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. Kaplama sonrası kaplama/insört ara yüzeyi

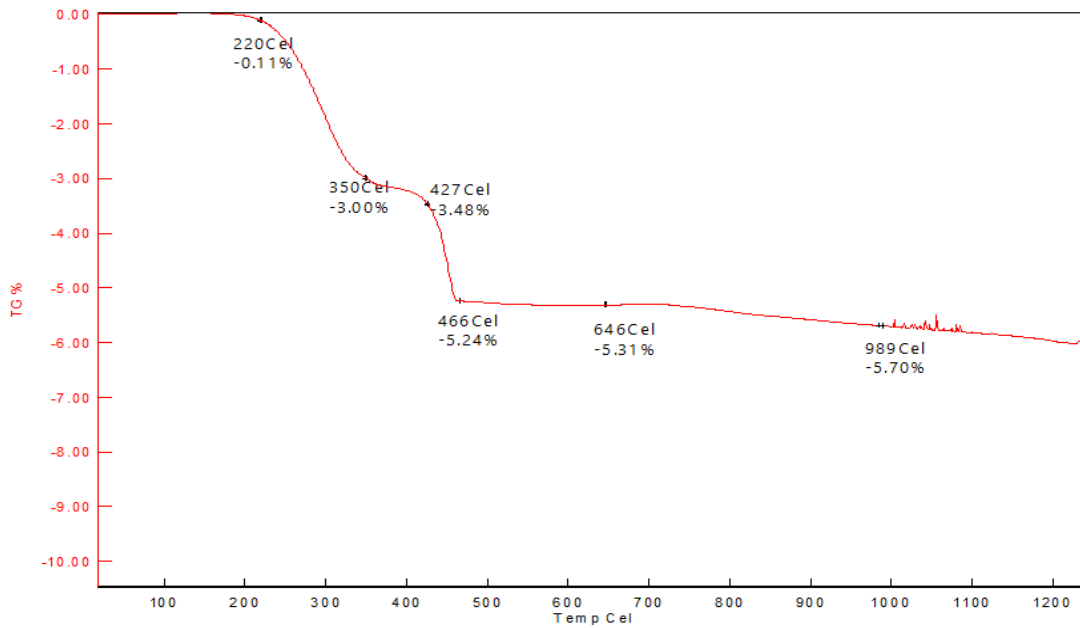
Sinterleme öncesi ve sonrası Ni kaplamada meydana gelen sertlik değişimini karşılaştırmak için 10x10x40 mm boyutlarında prizmatik numune hazırlanmış ve üzeri 100 µm nikel kaplanmıştır. Kaplama sonrası, TS 6503 EN ISO 4516 standardına göre en düşük kaplama kalınlığı ve uygulanacak yük dikkate alınarak Ni kaplamanın mikro sertliği ölçülmüştür (Şekil 5.8). Elektrolitik kaplama yöntemiyle kaplanan nikelin setliğinin 568.8-594,5 HV0.2 aralığında olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.8. Nikel kaplamanın sinterleme öncesi mikrosertliği

5.3. TGA, Enjeksiyon Ve Bağlayıcı Giderme İşlemleri

Deneyler de kullanılan besleme stokuna TGA analizi yapılarak (Şekil 5.9). ağırlık kayıplarının hangi sıcaklıklarda meydana geldiği belirlenmiştir. TGA analizine göre 200 °C’den sonra besleme stokunda ağırlık kayıpları başlamaktadır. Şekil 5.9 incelendiğinde deneyde 300 °C sıcaklığa çıkıldığında % 3 466 °C’ye çıkıldığında ise % 5,24 ağırlık kaybı meydana gelmektedir. TGA işlemi sonucunda ağırlık kayıplarının meydana geldiği sıcaklık değerleri dikkate alınarak sinterleme döngüsü belirlenmiştir.



Şekil 5.9. Termo Grametrik Analiz (TGA)Grafığı

Enjeksiyon işlemine WC-%9Co beslem stoku üretici firmanın tavsiye ettiği parametreler (Çizelge 4.7) kullanılarak başlanmıştır. Ancak firmanın tavsiye ettiği parametreler kullanıldığında kalıp dolumunun tam sağlanamadığı görülmüştür. Sıcaklık ve enjeksiyon basıncı kalıp dolumunu etkileyen önemli parametrelerdir (Ahn ve diğerleri 2008). Bununla birlikte WC- %10 Co’ın termal iletkenliği (90-100 W/mK) (Wang 2015) yüksek olduğu için besleme stoğunun katılaşma süresi plastik malzemelerden çok daha kısadır. Besleme stokunun kalıp içerisinde katılaşma süresini uzatmak ve böylece dolumu daha iyi sağlayabilmek için enjeksiyon tezgahının şartlandırıcısı °60 C’ye ayarlanarak kalıp sıcaklığı artırılmıştır. Kalıp dolumu sağlanana kadar enjeksiyon basıncı artırılarak denemeler yapılmıştır. 300 bar enjeksiyon basıncında kalıp dolumunun sağlandığı görülmüştür. Enjeksiyon işlemi sonrası numuneler kesilerek iç kısımda herhangi bir kusur

olup olmadığı kontrol edilmiştir. Belirlenen parametreler kullanılarak enjeksiyon yapıldığında numunelerde enjeksiyon hatası ortaya çıkmamaktadır (Resim 5.5).



Resim 5.5. Deney numunesinin enjeksiyon sonrası görüntüsü

Enjeksiyon işleminin ardından numunelere, etanol çözeltisi içerisinde 60 °C sıcaklıkta 48 saat çözündürme yoluyla bağlayıcı giderme işlemi uygulanmış ardından numuneler fırın içerisinde kurutulmuştur. Bağlayıcı giderme işleminden önce ve kurutmadan sonra numunelerin kütleleri hassas terazi yardımıyla ölçülmüştür. Bağlayıcı giderme işleminde ortalama % 2,04 oranında numunelerin kütlelerinin azaldığı tespit edilmiştir.

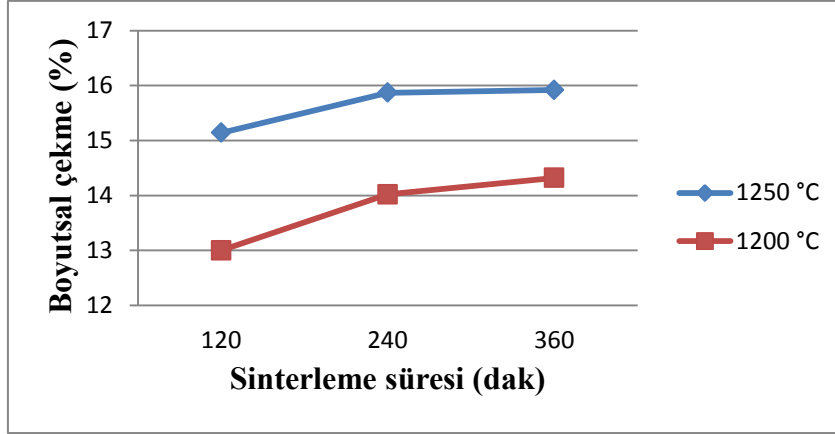
5.4. Sinterleme Sıcaklığının ve Süresinin Etkisi

5.4.1. Sinterleme sıcaklığının ve süresinin boyut değişimine etkisi

Sinterleme işleminden önce ve sonra deney numunelerinin çapları ölçülerek sıcaklık ve süreye bağlı olarak meydana gelen boyutsal değişimler yüzde olarak hesaplanmıştır (Çizelge 5.1, Şekil 5.10).

Çizelge 5.1. Sinterleme sonrası WC-%9Co'ın (%) boyutsal çekme miktarları

	120 dak	240 dak	360 dak
1250 °C	15,14	15,87	15,92
1200 °C	13	14,02	14,32



Şekil 5.10. Sinterleme sıcaklığının ve süresinin boyutsal çekmeye etkisi

Sıcaklık ve süre arttıkça boyutsal çekme oranı da artmaktadır ve elde edilen en yüksek boyutsal çekme 1250 °C 360 dakikada üretilen parçalarda %15,92 olarak ölçülmüştür (Şekil 3). Literatürde, WC-Co besleme stokunun boyutsal çekme miktarının %14-%15 olduğu ve sinterleme süresinin artmasıyla boyutsal çekmenin de arttığı belirtilmektedir (Sun ve diğerleri 2015; Baojun ve diğerleri 2002). Yaptığımız çalışmada elde ettiğimiz sonuçlar literatürle aynıdır.

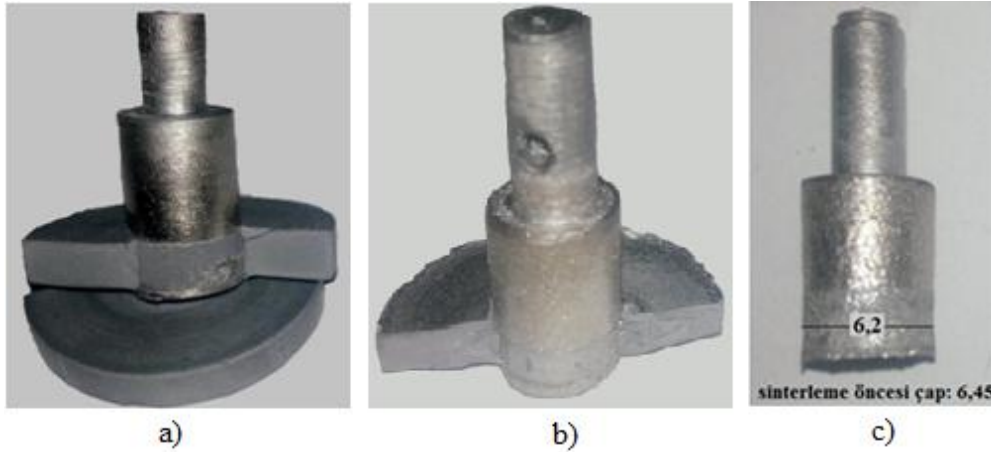
5.4.2. HSS İnsört ve ara bölgenin sıcaklığa göre davranışı

WC-Co besleme stokunun sinterlenmesinde yoğunluk, boyutsal çekme ve parça mukavemeti bakımından sinterleme sıcaklığı önemli bir parametredir. Ancak İTEK yöntemiyle WC-Co besleme stokundan parça üretilirken sinterleme sıcaklığının belirlenmesinde insört ve besleme stokunun termal özellikleri birlikte değerlendirilmelidir. TEK ve toz metalürjisi yöntemleriyle yapılan çalışmalarda WC-Co sisteminin sinterleme sıcaklığı Co oranına bağlı olarak 1300-1600°C arasında olduğu belirtilmektedir (Heaney 2012; Sarıtaş ve diğerleri 2007). Yapılan çalışmada hem insörtün hem de WC-Co'nun termal özellikleri dikkate alınarak sinterleme sıcaklıkları belirlenmiştir.

1300 °C'de yapılan sinterlemede HSS insört ergimektedir. 1250 °C 240 dakikada yapılan deneyde sinterleme sonrası HSS insört incelendiğinde ergime olmadığı ancak enjekte bölgenin olduğu kısmın çapı 6,45 mm'den 6,2 mm'ye düştüğü (Resim 5.5c) tespit edilmiştir. HSS ve WC arasında birleşme olabilmesi için arada yeterli basıncın da olması gerekmektedir. 1250 °C'de HSS malzeme, yumuşadığı için enjekte bölgedeki çekmeyle oluşan baskı kuvvetiyle plastik şekil değişimi sonucu çapı küçülmekte ve arada yeterli

basınç oluşmamaktadır bu yüzden 1250 °C de birleşme olmamakta veya zayıf olmaktadır (Resim 5.6b ve 5.6c) .

1200 °C sıcaklıkta ise birleşme bakımından daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Yaptığımız çalışmada mekanik testler sonucu kırılan parçalar incelendiğinde Resim 5.6a'da insört üzerinde WC tabakası görülmektedir. Bu durum kırılmanın WC tarafından olduğunu ve 1200 °C sıcaklıkta insört ve enjekte bölge arasında birleşmenin sağlandığını göstermektedir. Sıcaklık, basınç ve süre difüzyonu etkileyen önemli parametrelerdir ve farklı malzemelerin birleştirilmesinde ara bölgenin mukavemetini önemli ölçüde etkilemektedirler (Chen ve diğerleri 2012; Kurt ve diğerleri 2007). Johnson ve arkadaşları (2003), iç içe geçen farklı malzemelerden parça üretilirken ara yüzeyde birleşme için yeterli basıncın olması gerektiğini belirtmektedirler. Ancak İTEK yöntemiyle iç içe geçen farklı malzemelerden parça üretilirken sinterleme işleminde insört ve besleme stoku arasında oluşan basınç enjekte kısmın boyutsal çekmesi sonucu doğal olarak oluşmaktadır. Bu nedenle ara bölgede yeterli basıncın elde edilebilmesi için insört, boyutunu koruması gerekmektedir. Sıcaklık ve sürenin artırılması, HSS insörtün yumuşamasına neden olduğu için ara bölgede oluşan basıncı da etkilemektedir.

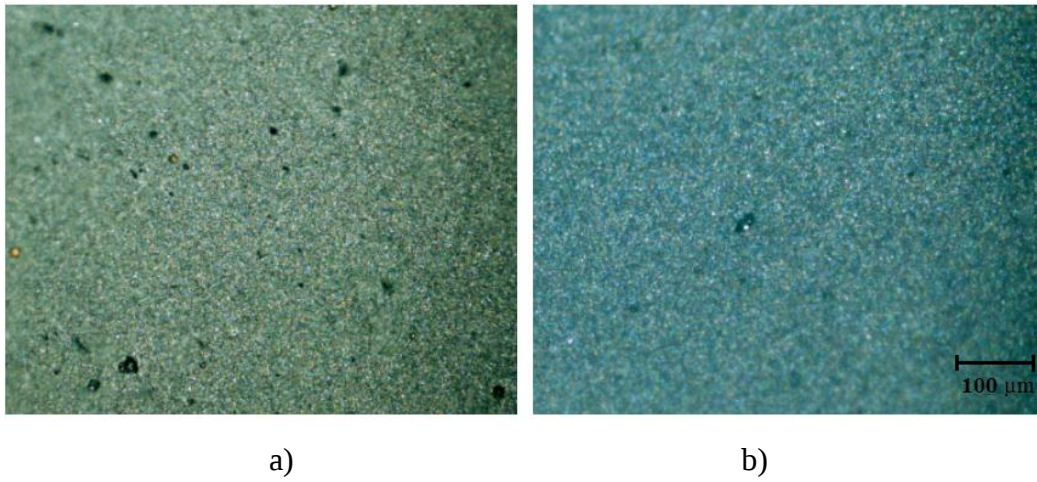


Resim 5.6. Mekanik testler sonucu kırılan parçalar a) 1200 °C, 240 dak b)1250 °C, 120 dak c) 1250 °C, 240 dak

5.4.3. Sinterleme sonrası enjekte kısmın (WC-%9Co) incelenmesi

İnsörtün termal özelliklerinden dolayı WC-Co besleme stokunun sinterlenmesi literatüre göre daha düşük sıcaklıkta yapılmıştır ancak besleme stokunun sinterleme sonrası gözenek

kalmadan yeterli yoğunluğa ulaşması da önemlidir. Sinterleme sonrası besleme stoku içerisinde kalan gözenekler çentik faktörü oluşturacağından üretilen parçanın mukavemetini ve yorulma dayanımını azaltacaktır. Şekil 5.11’de WC-Co besleme stokunun 1200 °C ve 1250 °C’de 360 dakika sinterleme sonrası görüntüsü verilmiştir. WC-Co besleme stokunun sinterleme sıcaklığı 1250 °C’den 1200 °C’ye düşürüldüğünde gözenek artışı belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle HSS insörtte ergime olmaması için sinterleme sıcaklığının azaltılması besleme stokunun sinterlenmesini olumsuz olarak etkilemektedir.

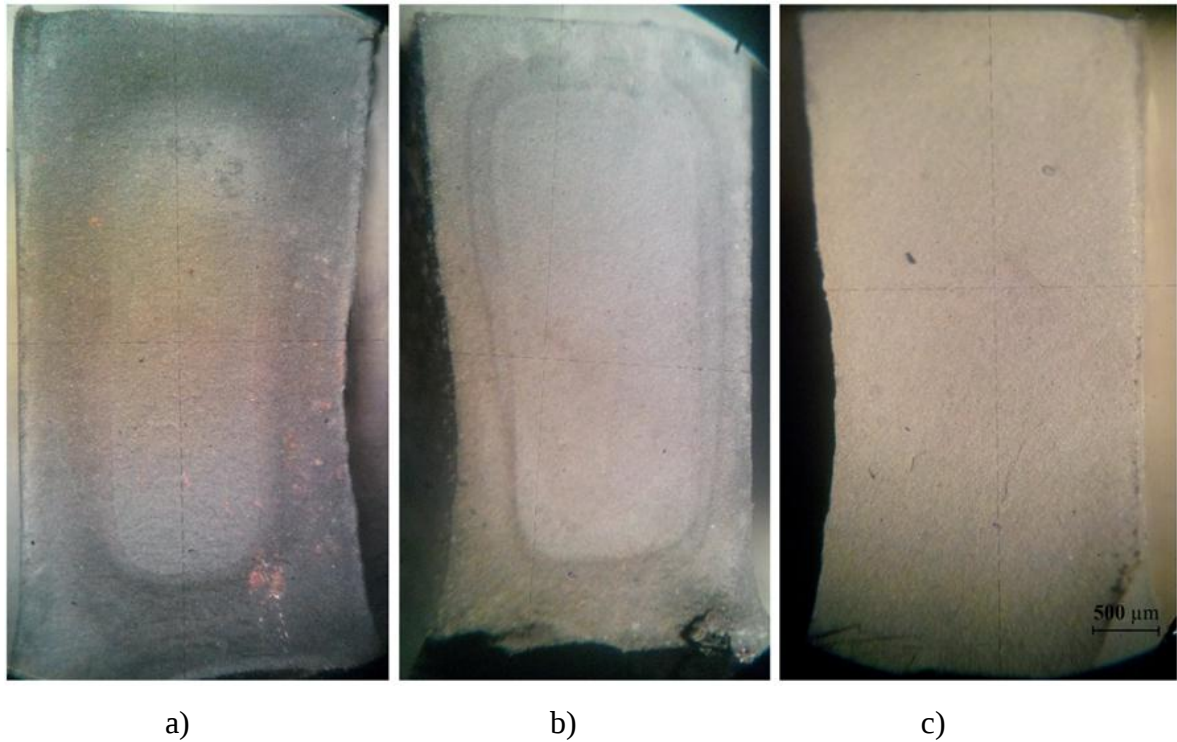


Şekil 5.11. WC-Co sinterleme sonrası görüntüsü a) 1200 °C, 360 dak. b) 1250 °C 360 dak.

Sinterleme sonrası WC-Co kısmını incelemek için deney numuneleri kırılarak kesit görüntüleri alınmıştır. Görüntüler incelendiğinde 1200 °C’de yapılan sinterleme sonrası numunenin dış kısmından içe doğru koyudan açık griye renk değişimi olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5.12 a,b). Yaptığımız çalışmada HSS insörtün termal özelliklerinden dolayı sinterleme sıcaklığı literatürden daha düşük olarak seçilmiştir. Kesit görüntülerde ki renk değişimi, sinterleme sıcaklığına ve süresine bağlı olarak WC-Co besleme stokunun yoğunlaşma durumundan dolayı ortaya çıktığı tahmin edilmektedir. Tungsten karbür Co ile sıvı faz sinterlenme yapılmakta ve sinterlemede sıvı faz oluşumu partiküller arası bağlantıyı ve parça özelliklerini etkilemektedir (German ve Bose 1997). Ancak 1200 C sinterleme sıcaklığında sıvı faz oluşumundan bahsedilemez (Upadhyaya 1998). Literatürde, 800 °C civarında WC’ün katı Co içerisinde çözünümü başladığı (Haglund ve Agrsen 1998) 900 °C’den 1200 °C’ye çıkıldığında katı Co çözeltisi (0.05-2µm boyutlarındaki) doygun hale geldiği ve bu sıcaklık aralığında Co’ın WC tozları arasında

yayılmasıyla katı hal çekmesi ortaya çıktığı ve katı Co çözeltisi 1200-1280 °C aralığında maksimum yoğunluğa ulaştığı belirtilmektedir (Allibert 2001). Ayrıca katı çözelti halindeki Co'nun sıvı faza geçmesinde, C oranı da önemlidir (Guo ve diğerleri 2013). 1200 °C sıcaklıkta sıvı faz oluşumu başlamasa da katı hal çekmesiyle WC-Co sistemi yoğunlaşmaktadır. WC-Co sisteminde oluşan katı hal çekmesinin, beraberinde dıştan içe doğru artan bir basınç meydana getirdiği de söylenebilir. Bu nedenle yoğunlaşmanın içten dışa doğru olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.12a ve b incelendiğinde içten dışa doğru oluşan açık gri renk WC-Co sisteminin yoğunlaşan kısmını göstermektedir. Şekil 5.12a ve b karşılaştırıldığında sinterleme süresinin 120 dakikadan 240 dakikaya çıkarılmasıyla iç kısımda yoğunlaşan bölgenin de arttığı görülmektedir.

1250 °C'de yapılan sinterleme sonrası kesit görüntü incelendiğinde ise numunenin bütün kesiti açık gri renkte olduğu ve yoğunlaşmanın daha iyi sağlandığı görülmektedir (Şekil 5.12c). Benzer olarak WC-Co sinterlenmesiyle ilgili yapılan bazı çalışmalarda da WC-Co'nun daha iyi sinterlenebilmesi için 1200 °C'den daha yüksek sıcaklıklara çıkılması gerektiği belirtilmektedir (Jewett ve Bard 2015; Upadhyaya 1998).



Şekil 5.12. Sinterleme sonrası numunelerin kesit görüntüsü a) 1200 °C 120 dak. b) 1200 °C 240 dak. c) 1250 °C 240 dak.

5.5. Sinterleme Sonrası Yoğunluk

WC-Co Besleme stokunun sinterlenmesinde sıcaklık artıkça hacimce daha fazla küçülme meydana geldiği için yoğunlukta buna bağlı olarak artmaktadır. Bu nedenle yoğunluk en iyi sinterleme şartlarında ölçülmüştür. 10 mm çapında ve 10 mm boyunda numuneler 1300 °C 240 dakika sinterlendikten sonra, hassas terazi yardımıyla Arşimet prensibine göre yoğunluğu 14,04 g/cm³ olarak ölçülmüştür. Besleme stoku üretici firmanın kataloğunda sinterleme sonrası %100 yoğunluğun 14,6 g/cm³ olduğu belirtilmektedir. Hesaplandığında deneylerde % 96,16 yoğunluğa ulaşıldığı tespit edilmiştir.

5.6. Sinterleme Sonrası Sertlik

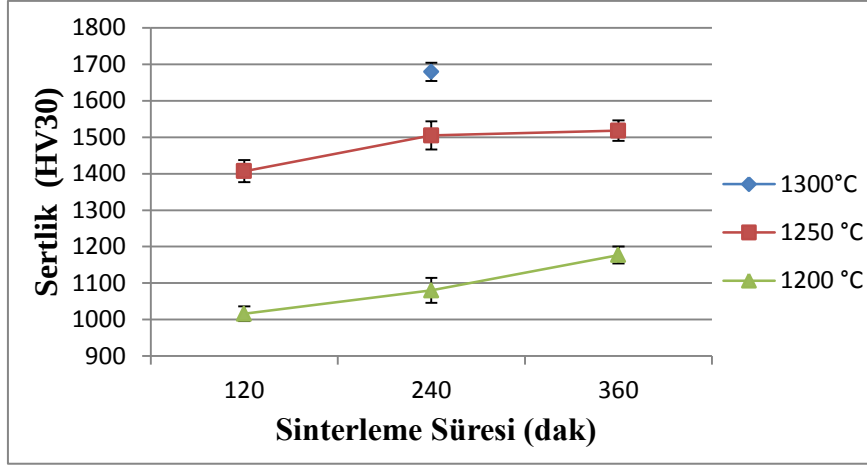
Sinterleme işleminden sonra ara bölgedeki mikrosertlik, WC-Co'ın ve insörtlerin sertlikleri ölçülmüş sinterleme parametrelerinin sertliğe etkisi araştırılmıştır.

5.6.1. WC-Co'ın sertliği

Yapılan deneylerde, 1300 °C sıcaklıkta 240 dakika sinterleme süresiyle elde edilen en yüksek sertlik değeri 1679 HV'dir (Çizelge 5.2). Şekil 5.13'de verilen grafik incelendiğinde sıcaklık ve süre artıkça WC-Co'ın sertliğinin de arttığı görülmüştür. Sertlik değerinin, sıcaklık ve süre artıkça yükselmesi ve deneylerde elde edilen sertlik değerleri literatürle uyumludur (Heng ve diğerleri 2013; Erdoğan ve diğerleri 2013). Bununla birlikte literatürde kesici takım uygulaması için WC-Co'ın sertliğinin 1500-1900 HV aralığında olduğu belirtilmektedir (Saritaş ve diğerleri 2007). Literatürle karşılaştırıldığında WC-Co malzemenin sertliği kesici takım için yeterli düzeydedir.

Çizelge 5.2. Sinterleme sonrası WC-Co'ın sertliği (HV)

Süre (dak) →		120	St. Spm.	240	St. Spm.	360	St. Spm.
Sıcaklık (°C)	1200	1016	20	1080	34	1177	23
	1250	1407	30	1505	39	1518	28
	1300			1679	25		



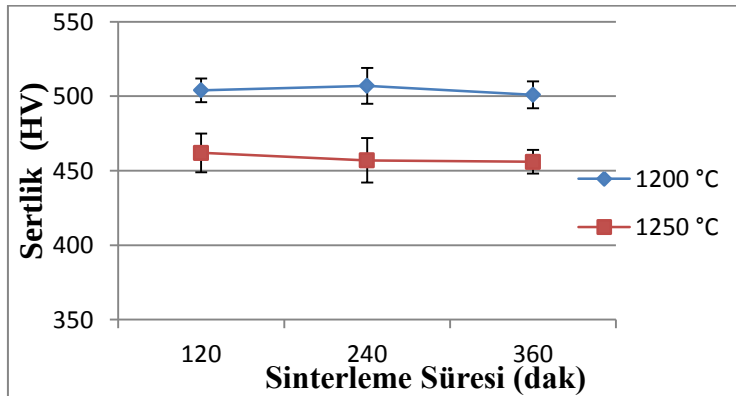
Şekil 5.13. Sinterleme sıcaklığı ve süresinin WC-%9Co'nun sertliğine etkisi

5.6.2. HSS insörtün sertliği ve ara bölgenin sertlik profili

M2 HSS insörtün sertlik değerleri 1200 C'de sinterleme sonrası 499-513 HV aralığında iken 1250 C sinterleme sonrası 460 HV civarında ölçülmüştür (Çizelge 5.3 ve Şekil 5.14). Bu malzeme için kataloğunda 1190-1230 °C arasındaki sıcaklıkta 300-350 saniye bekletilerek yapılan ısıtma işlemle elde edilebilecek sertlik değerleri 748-834 HV arasında olduğu belirtilmektedir. Ancak sinterleme süresi uzun olduğu ve malzeme fırında yavaş soğutulduğu için katalog değerlerinden daha düşük sertlikler elde edilmiştir.

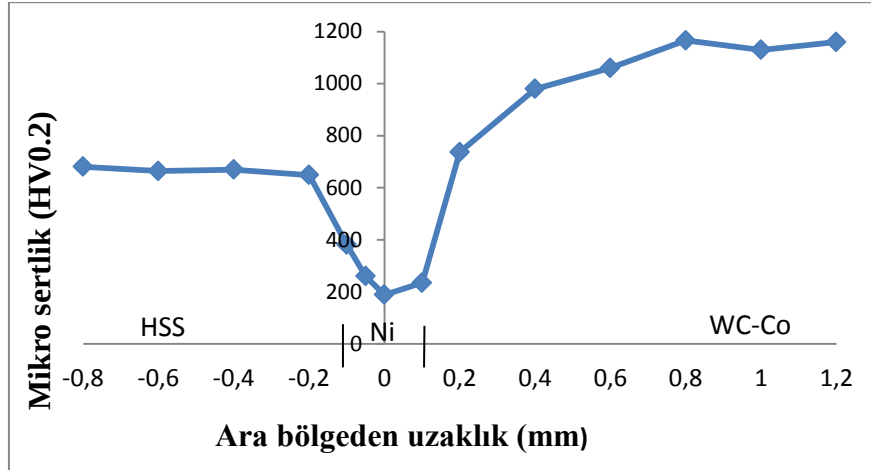
Çizelge 5. 3. Sinterleme sonrası HSS insörtün sertliği (HV)

Sıcaklık (°C)	Süre (dak)					
	120	St. Spm.	240	St. Spm.	360	St. Spm.
1200	504	8	507	12	501	9
1250	462	13	457	15	456	8



Şekil 5.14. Sinterleme sonrası HSS insörtün sertliği

Sertlik profiline göre, HSS insört bölgesinin ortalama sertliği 671 HV olurken, ara bölgeye yakın kısımlarda enjekte bölgenin ortalama sertliği 1152 HV olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.15). 1200 °C sinterleme sonrası HSS insört kullanılan numunenin ara bölgesindeki Ni katmanının sertliği ortalama 247 HV ölçülmüştür. Ara katmanın sertliği sinterleme öncesine göre daha düşüktür.



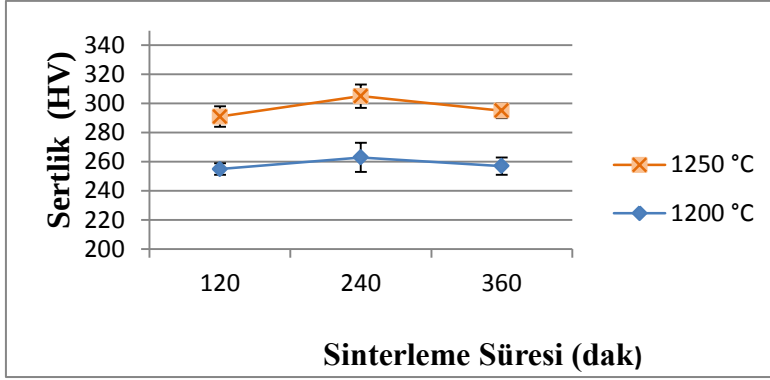
Şekil 5.15. HSS insört kullanılan numunenin ara bölgesindeki sertlik profili (1200 °C, 240 dak, 100 µm Ni)

5.6.3. 4340 insörtün sertliği ve ara bölgenin sertlik profili

4340 insörtün 1200 °C sinterleme sonrası sertliği 286-294 HV aralığında iken 1250 °C sinterlemeden sonra 254-259 HV aralığına düşmektedir (Çizelge 5.4. ve Şekil 5.16). Sinterleme sıcaklığı arttığında her iki insörtün de sertlik değeri azalırken sinterleme süresinin artmasıyla çok fazla değişmemektedir.

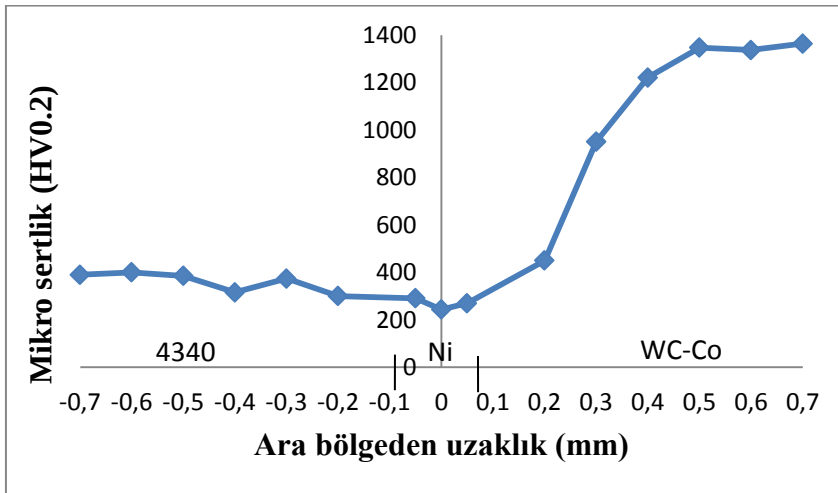
Çizelge 5. 4. Sinterleme sonrası 4340 insörtün sertliği (HV)

Sıcaklık (°C)	Süre (dak)					
	120	St. Spm.	240	St. Spm.	360	St. Spm.
1200	255	7	263	8	257	5
1250	291	4	305	10	295	6
1300			269	6		



Şekil 5.16. Sinterleme sonrası 4340 insörtün sertliği

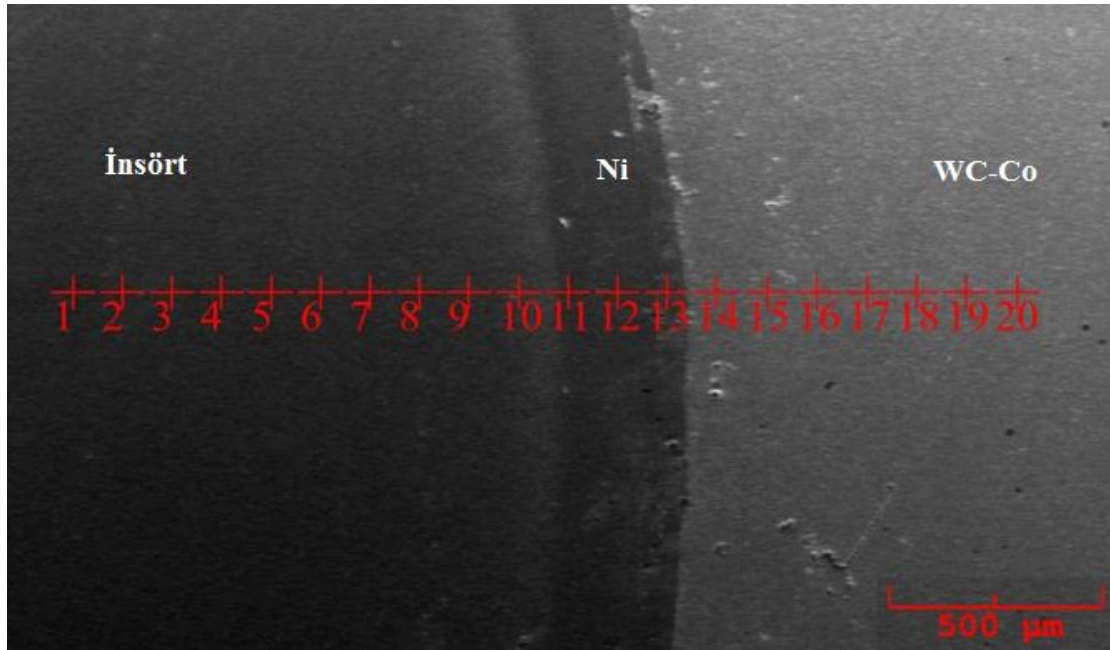
Şekil 5.17’de 1250°C sıcaklık ve 240 dakika bekleme süresinde sinterlenmiş WC Co/Ni/4340 test numunesinin ara bölgesinde ki sertlik profili gösterilmiştir. Bu profile göre, insört bölgesinin ortalama sertliği 391 HV olurken, ara bölgeye yakın kısımlarda enjekte bölgenin ortalama sertliği 1364 HV olduğu belirlenmiştir. Sinterleme işleminden önce nikel tabakanın sertliği 581 HV olarak ölçülürken sinterlemeden sonra ise ortalama 268 HV olarak ölçülmüştür. Sinterleme işleminden sonra Ni ara tabakanın sertliği sinterleme öncesine göre yarıya düştüğü ve orta noktada daha çok azaldığı görülmüştür. Daha önce ara bölgenin mikro görüntülerinde kaplama kalınlığının 100 μm ’den 160 μm ’ye çıktığı belirlenmiştir. Bu nedenle numune soğurken insörtün WC’den daha çok daralmasıyla birlikte WC-Co/insört arasında oluşan çekme etkisiyle Ni katmanın kalınlığının arttığı, ortada daha yumuşak bir yapı oluştuğu ve böylece Ni ara tabakanın da sertliğinin azaldığı düşünülmektedir.



Şekil 5.17. 4340 insört kullanılan numunenin ara bölgesindeki sertlik profili (1250 °C, 240 dak, 100 μm Ni)

5.7. Element Geçişleri

Kullanılan her iki insörtle ara bölgenin mukavemeti bakımından en iyi sonuç alınan şartlarda yapılan deney sonrası, besleme stoku/ara katman/insört arasında element geçişlerini incelemek için iç kısımdan dışa doğru 20 noktada EDS analizi yapılmıştır (Şekil 5.18). Analiz sonrası ara bölgedeki element konsantrasyon profilini gösteren grafikler oluşturulmuştur.



Şekil 5.18. EDS analizi yapılan bölge

5.7.1. HSS/Ni/WC-Co ara bölgesindeki element geçişleri

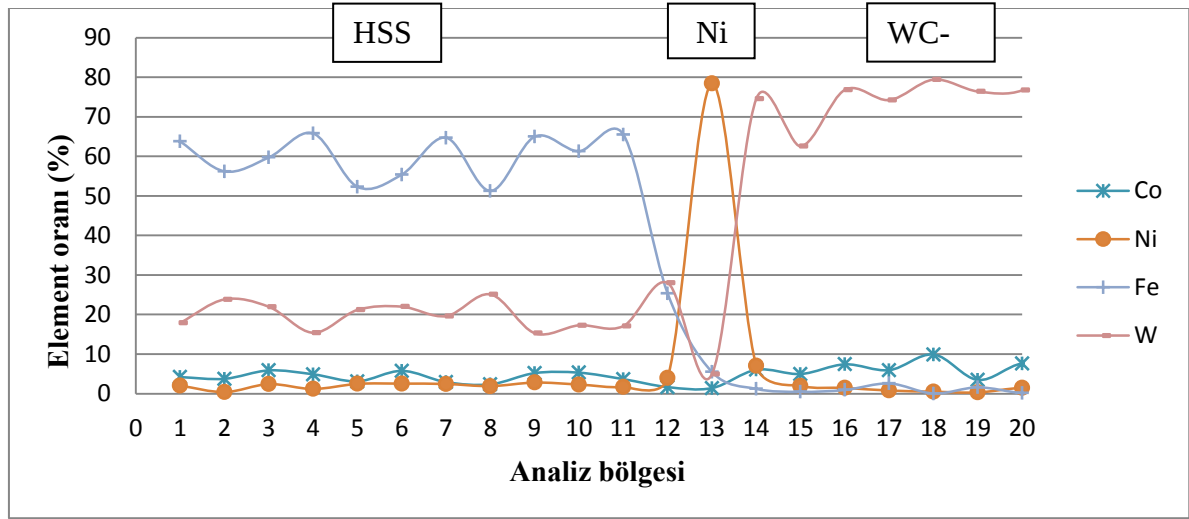
Üretici firma tarafından yapılan spektral analizde HSS malzeme içerisinde %81,83 oranında Fe ve %6,19 oranında W bulunduğu belirtilmektedir. Analize göre HSS malzeme içerisinde Co ve Ni bulunmamaktadır (Çizelge 4.3).

HSS insört kullanılan numunede yapılan EDS analizi değerleri Çizelge 5.5’de bu değerlerden elde edilen grafik Şekil 9.18’de verilmiştir. Sinterleme sonrası yapılan EDS analizinde HSS insörtteki Fe, WC-Co tarafına difüzyon olduğu için ara bölgeye yakın kısımlarda ortalama % 60,07’ye düşmüştür. WC-Co tarafından insörte ortalama % 14,5 oranında W difüzyon ol urken Co ortalama % 4,27 oranında difüzyon olmuştur. Ara

katmandan HSS insöрте difüzyon olan Ni ortalama %2,02 iken WC-Co tarafına difüzyon olan Ni ise ortalama % 1,08'dir.

Çizelge 5.5. HSS insört kullanılan parçada yapılan noktasal element analizi değerleri (%)

	İnsört										Ni ara katman			WC-Co						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Fe	63,7	56,2	59,7	65,7	52,2	55,3	64,7	51,2	64,9	61,2	65,4	25,3	5,4	1,2	0,46	0,94	2,58	0,04	1,6	0,14
Co	4,19	3,76	5,88	4,9	3,12	5,77	2,91	2,36	5,2	5,31	3,67	1,66	1,41	6,04	4,97	7,42	5,95	9,9	3,47	7,62
Ni	2,03	0,4	2,41	1,19	2,48	2,54	2,45	1,91	2,81	2,31	1,69	4	78,3	7,02	1,99	1,45	0,79	0,5	0,31	1,45
W	17,9	23,8	21,9	15,4	21,1	22	19,6	25,1	15,2	17,2	17,1	27,9	4,96	74,5	62,5	76,8	74,2	79,3	76,3	76,6



Şekil 5.19. Ara bölgedeki element konsantrasyon profili (%) (HSS/Ni/WC-Co, 1200 °C, 240 dak.)

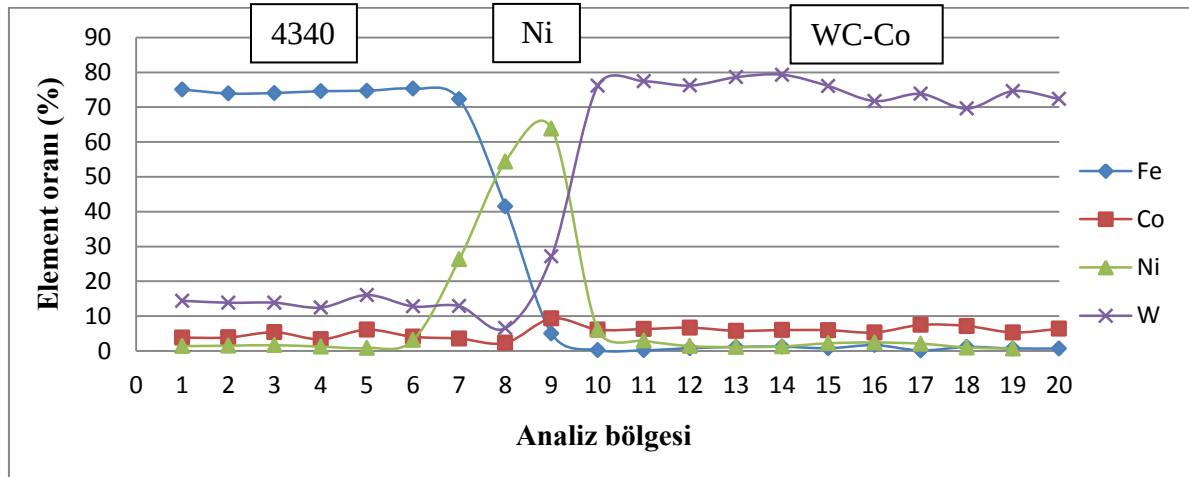
5.7.2. 4340/Ni/WC-Co ara bölgesindeki element geçişleri

Üretici firmadan alınan 4340 malzemenin spektral analiz raporunda %95,91 oranında Fe ve %1,74 oranında Ni bulunduğu fakat W ve Co olmadığı belirtilmektedir (Çizelge 4.3).

4340 insört kullanılan numunede yapılan EDS analizi değerleri Çizelge 5.6'da bu değerlerden elde edilen grafik Şekil 9.19'da verilmiştir. Sinterleme sonrası EDS analizi yapıldığında 4340 insörtteki Fe oranı ara bölgeye yakın kısımlarda ortalama %74,2'ye düştüğü ve WC-Co tarafından insöрте ortalama %13,7 oranında W ve ortalama %4,41 oranında Co difüzyon olduğu tespit edilmiştir. Sinterleme sonrası 4340 insörtteki Ni oranı (ortalama %1,66) sinterleme öncesine göre çok fazla değişmezken WC-Co tarafına difüzyon olan Ni ise ortalama %1,82'dir.

Çizelge 5.6. 4340 insört kullanılan parçada yapılan noktasal element analizi değerleri

4340 İnsört								Ni ara katma			WC-Co									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Fe	75,0	73,9	74,0	74,5	74,7	75,2	72,2	41,4	5,02	0,25	0,2	0,8	1,17	1,25	0,79	1,69	0,16	1,17	0,73	0,72
Co	3,83	3,88	5,38	3,35	6,12	4,08	3,57	2,33	9,33	6,16	6,3	6,7	5,8	6,01	5,98	5,31	7,5	7,18	5,33	6,36
Ni	0,86	0,9	1,52	1,68	1,26	0,88	3,15	26,3	54,4	63,8	6,12	3	1,4	1,13	1,31	2,23	2,45	2,11	1,02	0,69
W	14,4	13,8	13,8	12,4	16,0	12,7	12,8	6,56	27,1	76,1	77,4	76,2	78,6	79,3	76,0	71,7	73,8	69,5	74,6	72,3



Şekil 5.20. Ara bölgedeki element konsantrasyon profili (%) (4340/Ni/WC-Co, 1250 °C, 240 dak.)

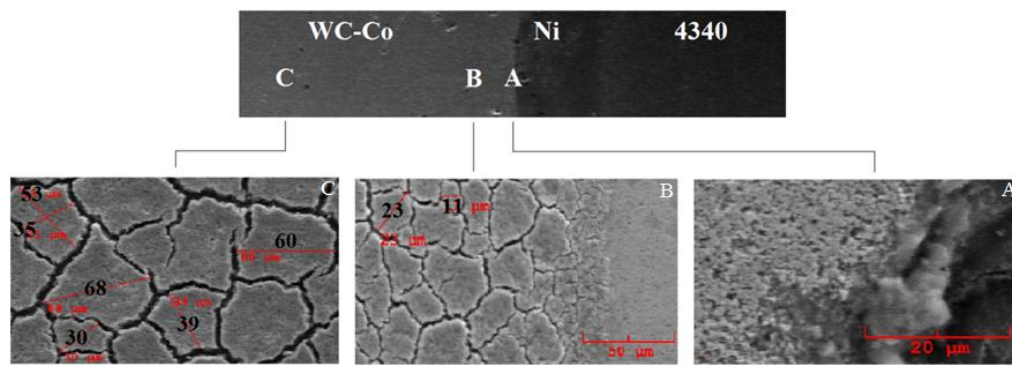
5.7.3. Element geçişlerinin değerlendirilmesi

1200 °C sıcaklıkta HSS kullanılarak yapılan deneylerde ara bölgenin dayanımı bakımından daha iyi sonuçlar alındığı için EDS analizi de, bu sıcaklıkta üretilen numune üzerinde yapılmıştır. 4340 insört kullanılarak üretilen numunenin EDS analizinde ise 1250 °C sıcaklıkta sinterlenen numune kullanılmıştır. Her iki insörtle üretilen numuneler karşılaştırıldığında Fe, W, Ni ve Co element geçiş oranlarının birbirine yakın olduğu görülmüştür. WC-Co ve çeliğin difüzyon kaynağıyla birleştirilmesi için yapılan çalışmalarda işlem sıcaklığı 850-1100 °C arasında değişmekte ve hem difüzyon hemde dayanım bakımından iyi sonuçlar alınmaktadır (Barrena ve diğerleri 2010; Chen ve diğerleri 2012; Guo ve diğerleri 2016). Bu nedenle 1200-1250 °C sıcaklığın element geçişleri bakımından yeterli olduğu ve insörtler arasındaki 50 °C'lik farkın da difüzyonu çok etkilemediği ortaya çıkmaktadır.

Sinterleme sonrası numunenin insört tarafında yapılan EDS analizinde, aktivasyon enerjisi yüksek (Callister 2007) olmasına rağmen W geçişi HSS ve 4340 insörtlere diğer elementlerden daha fazladır. Ayrıca nikelin atom çapı daha küçük olmasına rağmen kobalt, her iki insört içerisine doğru nikelden daha fazla difüzyon olmuştur. Her iki durum da konsantrasyon farkıyla açıklanabilir. Difüzyon mekanizmasında, iki malzeme arasındaki element miktarının farkı arttığında konsantrasyon gradyanı yüksek olduğu için, malzemeler arası element geçiş oranı da artmaktadır (Kurt 1996). Bu nedenle W her iki insöрте de diğer elementlerden daha fazla difüzyon olmuştur. WC-Co tarafında ağırlıkça %9 Co olması da kobaltın nikelden daha fazla difüzyon olmasına neden olmuştur. Bunlarla birlikte kullanılan ara tabaka element geçişlerini kolaylaştırmaktadır (Aydın 2008). Nikel, insöрте difüzyon olmasıyla element geçişlerini kolaylaştırmakta ve insört tarafına W ve Co geçişinin artmasına etki etmektedir.

5.8. Ara Bölgedeki Mikroyapı

4340 insört kullanılan numunenin ara bölgesi zımparalanmış ardından parlatma işlemi yapılarak elektroliz yoluyla dağlanmıştır. Şekil 5.21'de A bölgesinde tane oluşumu görülmezken B bölgesinde tane oluşumu başlamaktadır. B bölgesinden dışa doğru tane oluşumu başlamakta ve tane boyutları büyümektedir. B bölgesinde tane büyüklüğü 20 μm civarındayken C bölgesinde 50 μm – 60 μm arasındadır.



Şekil 5.21. Ara bölgedeki mikroyapı (WC-Co/Ni/4340, 1250 °C, 240 dak)

WC-Co sisteminde W ve C atomları WC toz taneciklerinin yüzeyinden ayrılarak Co içerisinde çözünür. Çözünen W ve C atomları diğer WC taneciklerine doğru yayınır ve tekrar kristalleşerek WC tanelerinin büyümesine neden olurlar (Konyashin ve diğerleri 2009). Bununla birlikte literatürde tane büyümesinde karbon oranının etkili olduğu

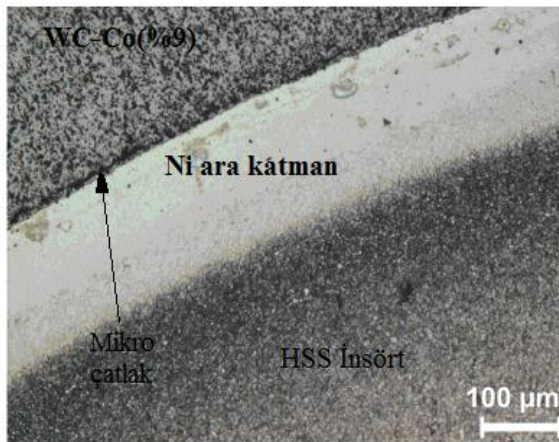
belirlenmektedir (Sugiyama ve diğeri 2015). WC tane büyümesini engellemek için VC ve Cr_2C_3 gibi tane büyümesi engelleyicileri (grain growth inhibitör) kullanılmaktadır. WC-Co sisteminde sıvı faz oluşumu 1275-1280 °C civarında başlamaktadır. VC ve Cr_2C_3 gibi bileşikler 1200-1250 °C arasında Co matrisi içerisinde WC den daha düşük sıcaklıkta çözündüğü için oluşan sıvı faz doymuş çözelti haline gelmektedir ve böylece W ve C çözünümü azaldığı için tane büyümesi de azalmaktadır (Konyasın ve diğeri 2010).

Yapılan çalışmada nikelin de tane büyümesi engelleyicilerine benzer olarak etkileri olduğu düşünülmektedir. Literatürde nikelin karbon çözünürlüğünü azalttığı belirtilmektedir (Zhou 2016). 4340/Ni/WC-Co EDS analizlerinde (Çizelge 9.6) genel olarak WC-Co tarafında dışa doğru Ni difüzyonunun azaldığı görülmektedir. Ni difüzyonunun dışa doğru azalmasıyla C çözünürlüğünün de arttığı ve buna bağlı olarak dışa doğru tane büyümesi meydana geldiği düşünülmektedir.

5.9. WC-Co/İnsörtün Ara Bölgesinin İncelenmesi

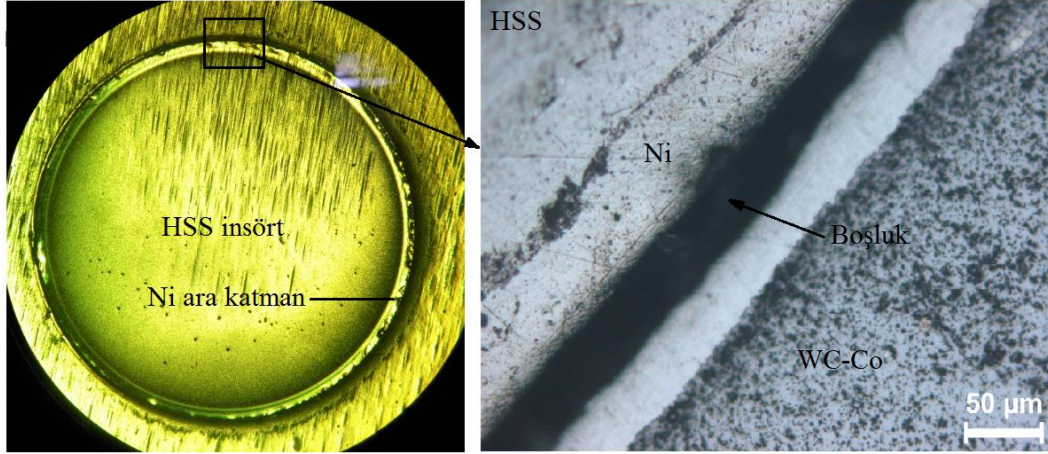
5.9.1. WC-Co/Ni/HSS ara bölge

1200 C’de sinterleme sonrası HSS insört ve 100µm Ni ara katman kullanılarak üretilen numunenin ara bölge görüntüsü Şekil 5.22’de verilmiştir. Ara bölgenin görüntüsü incelendiğinde birleşme sağlandığı anlaşılmaktadır. Ancak bazı bölgelerde mikro çatlaklar ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5.22. HSS insört ve 100µm Ni ara katman kullanılarak üretilen numunenin mikro görüntüsü (1200 °C, 240 dak.)

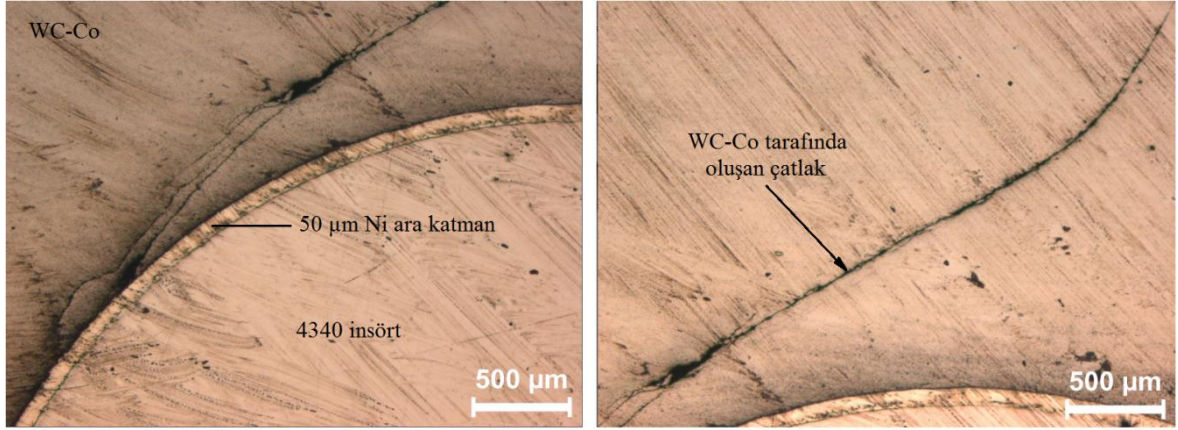
Sinterleme sıcaklığı 1250 °C'ye çıktığında ise WC-Co ve Ni ara katmanın birbirinden ayrılarak 50 µm'a yakın boşluk oluştuğu ve hatta insörtün WC-Co içerisinde oynadığı tespit edilmiştir. (Şekil 5.23).



Şekil 5.23. HSS insört ve 100µm Ni ara katman kullanılarak üretilen numunenin ara bölgesi (1250 °C 240 dak.)

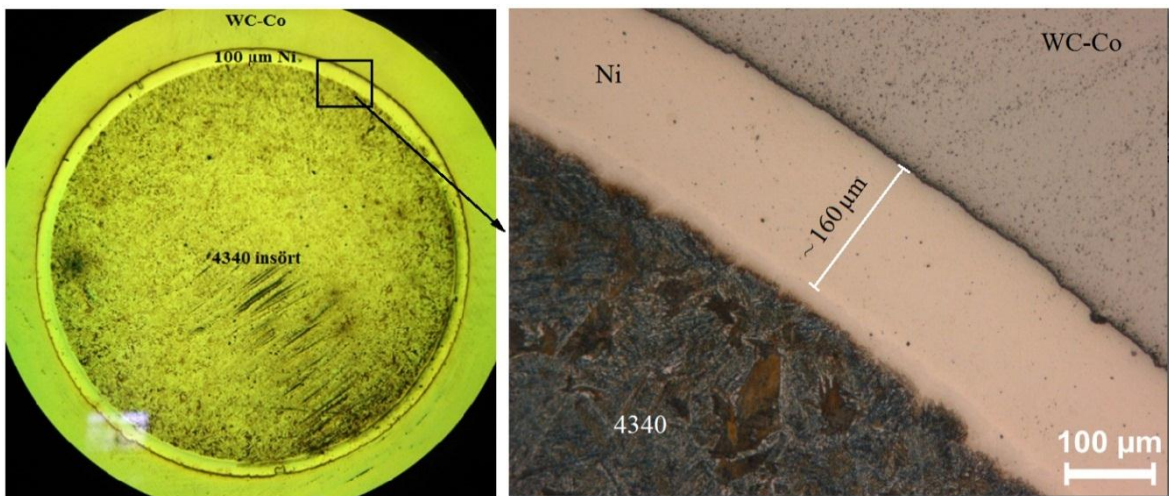
5.9.2. WC-Co/Ni/4340 ara bölge

Deneylerde genel olarak 4340 insört kullanılarak daha iyi sonuçlar alınmıştır. Ancak 4340 insört kullan numunelerin WC-Co tarafında çatlama ve kırılma meydana geldiği tespit edilmiştir (Şekil 5.24). Çatlayan veya kırılan numuneler incelendiğinde hepsinin 25 µm veya 50 µm ara katman kalınlığına sahip olduğu ve oluşan çatlakların aynı yönde ve şekilde ilerlediği belirlenmiştir. Bu sorunun WC-Co ve insört arasındaki genleşme-daralma farkından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sinterleme işleminde numune soğurken malzemeler arasındaki farklı boyutsal değişimler ve bununla birlikte WC-Co'ın gevrek olması çatlama veya kırılmaya neden olmaktadır. Bu durum, WC-Co tarafında çatlama olmaması için ara katmanın termal genleşme ve daralma farkını tolere edebilecek kalınlıkta olması gerektiğini ortaya çıkarmıştır. Literatürde de benzer olarak ara katman kalınlığının artmasıyla soğuma esnasında ara katmanda oluşan plastik deformasyonun kolaylaştığı ve ara bölgede hataların azaldığı belirtilmektedir (Guo 2016).



Şekil 5.24. 4340 insört ve 50 µm Ni ara katman kullanılan numunede çatlak oluşumu

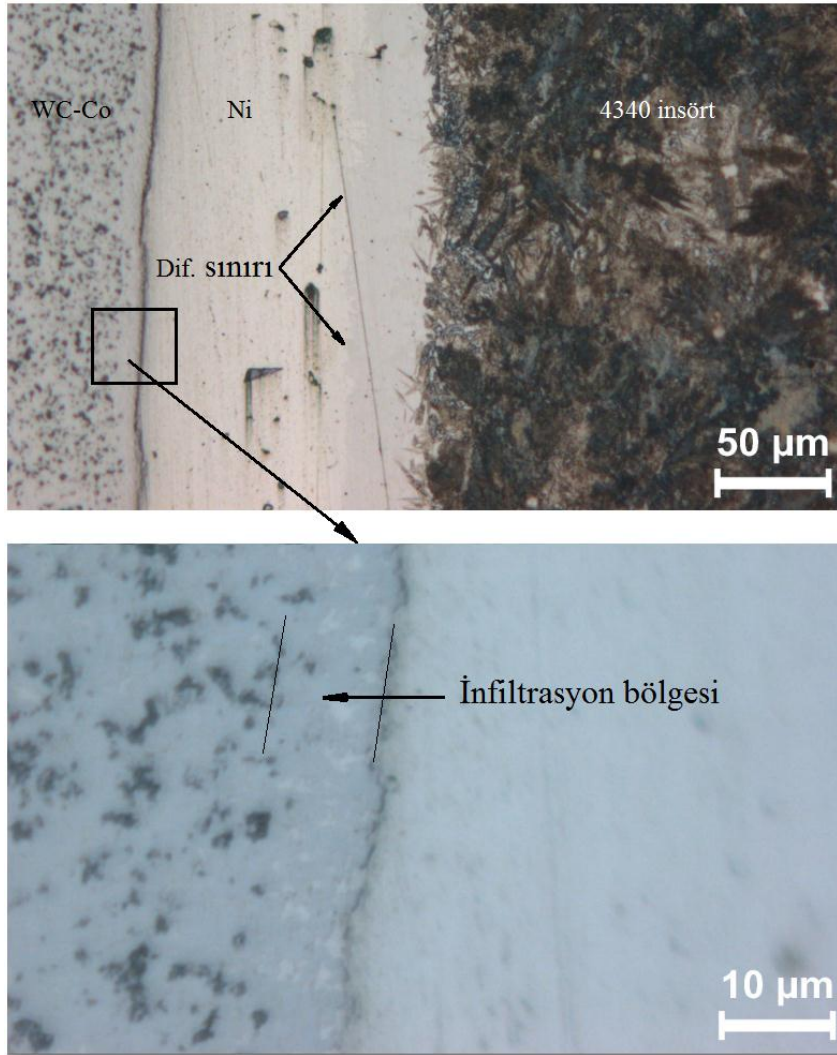
4340 insört ve WC-Co arasında 100 µm Ni ara katman kullanılmasıyla başarılı bir şekilde WC-Co besleme stokundan insörtlü parça üretimi yapılabilmektedir. 100 µm Ni ara katman kullanılarak üretilen numunelerin ara bölgelerine daha detaylı bakıldığında Sinterleme sonrası kaplama kalınlığının arttığı görülmektedir (Şekil 5.25). 100 µm olarak kaplanan Ni ara katmanın sinterlemeden sonra kalınlığı artarak yaklaşık olarak 160 µm olmuştur. Ni ara katman her iki tarafa yani WC-Co ve insörtlüde yeterli miktarda difüzyon olduğu için soğuma esnasında ara yüzeylerde ayrılma olmamakta ancak 4340 çelik malzemenin WC-Co'dan daha fazla daralmasından dolayı ara katman kalınlığı artmaktadır. Kaplama kalınlığının artmasıyla soğuma esnasındaki termal genişmeden kaynaklanan farklı boyut değişimi tolere edilebilmekte ve ara bölgede ortaya çıkabilecek hatalar önlenmektedir.



Şekil 5.25. 4340 insört ve 100µm Ni ara katman kullanılarak üretilen numunenin ara bölgesi (1250 °C 240 dak.)

Ni ara katman kullanımıyla WC-Co ve 4340 malzeme arasında birleşme elde edilebilmekle birlikte ara bölgedeki hatalar da azalmaktadır. Ni ara katman kullanımıyla WC-Co/Ni ve Ni/4340 ara yüzeylerde birleşmenin nasıl gerçekleştiğini anlayabilmek için Şekil 5.26 incelenmiştir. Şekil 5.26'da Ni ara katman ve 4340 insört arasında gri renkte bir bölge olduğu tespit edilmiştir. Bu bölgenin yaklaşık 35 μm genişliğinde difüzyon bölgesi olduğu düşünülmektedir. Yapılan EDS analizlerinde de Ni ara katmanın her iki tarafa difüzyon olmasıyla birlikte W ve Co'nun çelik tarafına Fe'nin de WC-Co tarafına difüzyon olduğu görülmüştür. Genel olarak difüzyon için malzemelerin ergime sıcaklıklarının 2/3 den daha yüksek sıcaklıklara çıkılmaktadır. Yapılan çalışmada Ni(0,125nm) ve Fe(0,124nm) elementlerinin atom çapları birbirine yakın ve sinterleme sıcaklığının 1250 °C olması Ni/4340 ara yüzeyde Ni ve demir atomlarının difüzyonunu kolaylaştırmaktadır. Literatürde tungsten ve paslanmaz çeliğin Ni ara katmanla birleştirilmesi konusunda yapılan çalışmada da nikel ve demirin intermetalik faz oluşmadan, yüksek sıcaklıkta Ni ve Fe atomlarının karşılıklı difüzyon olmasıyla katı çözelti oluşturabildikleri belirtilmektedir (Zhonga 2009). Şekil 5.26'da Ni/4340 ara yüzeyinde difüzyonla birleşme sağlanmadığı görülmektedir.

Şekil 5.26'da WC-Co/Ni ara yüzeyi incelendiğinde 10 μm WC-Co tarafına doğru Ni bölgeleri olduğu görülmektedir. Sinterleme esnasında Ni ara katmanın WC-Co içerisine infiltrasyon olduğu düşünülmektedir. Literatürde, bağlayıcı kompozisyonuna ve ağırlıkça yüzdesine bağlı olarak Fe-Ni-Co-W-C fazı için ergime sıcaklığının 1200-1300 C arasında olduğu belirtilmektedir (Uhrenius 1997). Demirin de WC-Co tarafına difüzyon olmasıyla 1250 °C sinterleme sıcaklığında WC-Co/Ni ara yüzeyinde Ni ağırlıklı Ni-Fe-Co-W-C sıvı fazı olduğu söylenilebilir. Bununla birlikte oluşan Ni ağırlıklı sıvı faz enjekte kısımla insört arasında oluşan basıncın da yardımıyla WC tozları arasına infiltrasyon olduğu sonucu çıkmaktadır.



Şekil 5.26. WC-Co/Ni ve Ni/4340 ara yüzeylerin mikroyapısı (50 µm ara katman, 1250 °C, 240 dakika sinterleme)

5.10. Birleşme Bölgesinin Kesme Mukavemeti

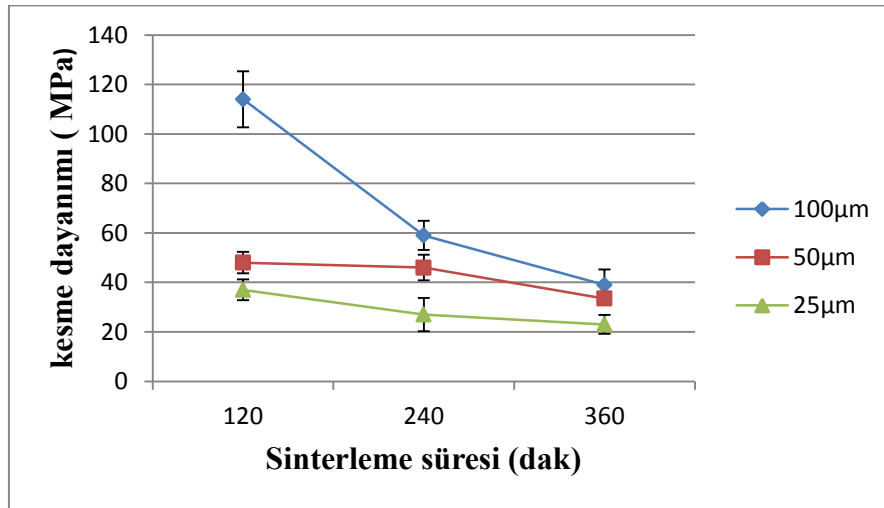
İnsörtlü olarak üretilen numunelerin sinterleme işlemlerinden sonra Şekil 8.5'te gösterilen kalıp kullanılarak kesme deneyi yapılmış ve ara bölgenin kesme mukavemeti ölçülmüştür. Kullanılan her iki insört ve diğer parametrelere göre kesme dayanımının değişimi incelenmiştir.

5.10.1. HSS insört ve Ni ara katman kullanılarak üretilen numunelerin ara bölgelerindeki kesme mukavemeti

HSS insört kullanılarak 1250 °C de sinterlenen numunelerin ara bölgelerindeki dayanımı kesme deneyi yapılamayacak kadar zayıftır. Ancak HSS insört şeklini koruduğu ve böylece

ara bölgede yeterli düzeyde basınç olduğu için 1200 °C’de sinterlenen numunelerin ara bölgelerindeki dayanımları daha iyidir. 1200 °C’de sinterlenen numunelere kesme deneyi yapılarak farklı sürelerde sinterlenen parçalar için elde edilen kesme dayanımı değerleri elde edilmiş ve grafik haline dönüştürülmüştür (Şekil 5.27). Grafik incelendiğinde ara katman kalınlığının artmasıyla ve sinterleme süresinin azalmasıyla kesme mukavemeti artmaktadır. Üretilen parçaların dış kısmı WC-%9Co iç kısmı HSS malzemeden oluşmaktadır. WC-%9Co malzemenin termal genleşme katsayısı ($5,7-5,9 \times 10^{-6}/K$) HSS malzemenin termal genleşme katsayısından ($11,5-12,9 \times 10^{-6}/K$) daha düşük olduğu için soğuma esnasında iç kısımdaki HSS malzemenin daha fazla daraldığı ve bundan dolayı ara bölgede gerilmeler artmaktadır. Kaplama kalınlığının artmasıyla soğuma esnasında termal genleşmeden dolayı malzemeler arasında meydana gelen ölçüsel fark daha iyi tolere edildiği için ortaya çıkan gerilmeler azalmakta ve bundan dolayı daha yüksek kesme dayanımı elde edilmiştir. 1200 °C sıcaklıkta 100 µm Ni ara katman kullanılan numunelerde 120 dakika sinterleme süresiyle ara bölgede elde edilen en yüksek kesme dayanımı 114 MPa’dır. En düşük kesme dayanımı ise 25 µm Ni ara katman kullanılarak 360 dakika sinterlenen numunelerde 23 MPa olarak elde edilmiştir. İTEK yöntemi yeni olarak geliştirilen bir yöntem olduğu için bu yöntemle WC-Co ve çelik malzemelerin birleştirilmesi konusunda yapılan çalışmalar sınırlıdır. Bu nedenle yaptığımız çalışmada elde ettiğimiz kesme dayanımı değerleri literatürde difüzyon kaynağıyla elde edilen verilerle kıyaslanmıştır. Literatürde difüzyon kaynağıyla birleştirilen WC-Co/çelik malzemelerin ara bölgedeki kesme dayanımı değerleri işlem parametrelerine bağlı olarak 45-620 MPa arasında değiştiği görülmüştür (Chen 2012; Barrena 2010). İTEK yöntemiyle bu çalışmada elde edilen en yüksek mukavemet değeri difüzyon kaynağıyla elde edilen birleştirmelerin mukavemet değerleriyle örtüşmektedir. Grafik incelendiğinde 1200 °C sinterleme sıcaklığında süre arttıkça ara bölgenin kesme dayanımı azalmaktadır. İTEK yönteminde malzemelerin sinterleme esnasında birleştirilmesi difüzyon kaynağına benzerdir. Bu nedenle difüzyon kaynağında oluşu gibi (Chen ve diğerleri 2012; Prince 1995) iki malzeme İTEK yöntemiyle birleştirilirken ara bölgenin mukavemeti bakımından basıncın önemli bir parametre olduğu ifade edilebilir. Yapılan çalışmada 1200 °C sıcaklıkta süre arttıkça HSS insört yumuşadığı için ara bölgede oluşan basıncın düştüğü ve bu nedenle süre arttıkça kesme dayanımının azaldığı düşünülmektedir. Ayrıca 100 µm ara katman kullanılarak yapılan deneylerde sinterleme süresi 120 dakikadan 240 dakikaya çıktığında kesme dayanımı keskin bir şekilde azaldığı Şekil 5.26’da görülmektedir. 50 µm ve 25 µm ara katman kullanılan deneylerde ise değişim, 100 µm’na göre daha az

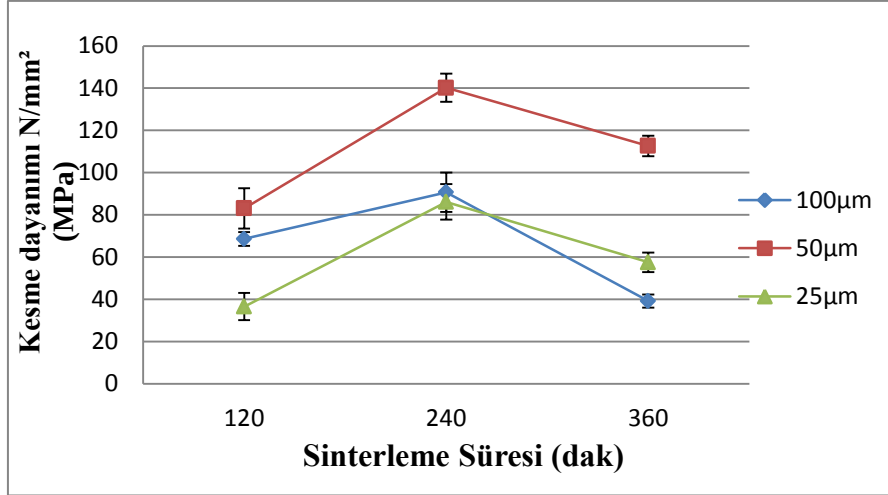
gerçekleşmiştir. Süre arttıkça kesme dayanımının düşmesinin temel nedeni HSS insörtün ve üzerindeki nikel kaplamanın yumuşamasıyla birleştirme için gerekli olan basıncın azalmasıdır. 100 μm nikel kaplama kullanılan deneylerde 120 dakika sinterleme süresinden 240 dakikaya çıkıldığında ara bölgede kaplama kalınlığına bağlı olarak yumuşayan bölgenin kalınlığının artmasıyla basıncın daha fazla azaldığı ve bundan dolayı 50 μm ve 25 μm kalınlığa göre kesme dayanımında keskin bir azalma meydana gelmiştir.



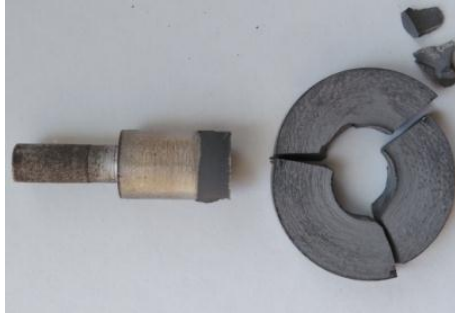
Şekil 5.27. HSS insört kullanılan numunelerde sinterleme süresinin kesme dayanımına etkisi (Sinterleme sıcaklığı :1200 °C)

5.10.2. 4340 insört ve Ni ara katman kullanılarak üretilen numunelerin ara bölgelerindeki kesme mukavemeti

1200 °C sıcaklıkta, farklı süre ve ara katman kalınlığında üretilen numunelerin ara bölgelerindeki kesme dayanımı grafiği Şekil 5.28’de verilmiştir. Buna göre 1200 °C sıcaklıkta 240 dakika süre ile yapılan deneylerde elde edilen kesme mukavemeti 120 ve 360 dakikadakilere göre daha yüksektir. Kesme deneyi sonrası 1200 °C sıcaklıkta 360 dakika sinterlenerek üretilen numune incelendiğinde, kırılmanın WC tarafında olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 5.29). Bununla birlikte sinterleme sıcaklığının etkisi araştırılırken 1200 C’de WC-Co’nun çok iyi sinterlenemediği görülmüştür (Şekil 5.11). Dolayısıyla kırılma WC-Co tarafında olduğu için, sinterlemede 240 dakikadan 360 dakikaya çıkıldığında kesme dayanımının azalmasının nedeninin, 1200 °C sıcaklıkta sinterlemedeki sorunlar olabileceği tahmin edilmektedir.

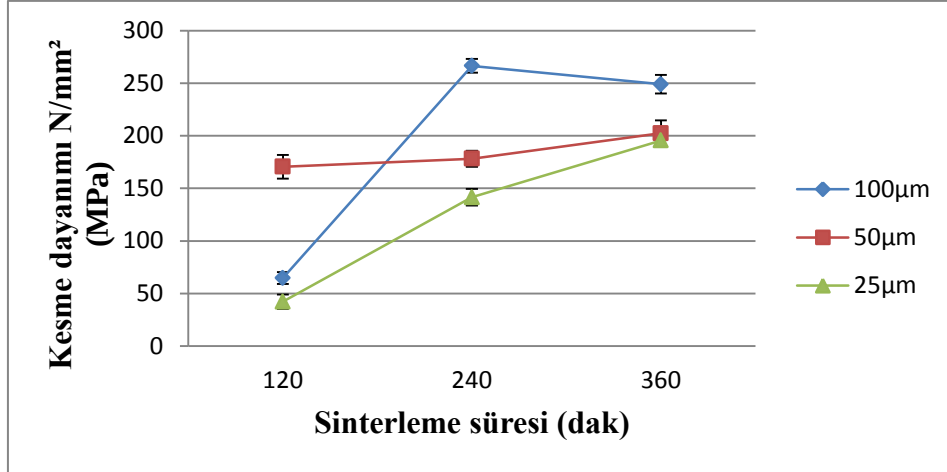


Şekil 5.28. 4340 insört kullanılan numunelerde sinterleme süresinin kesme dayanımına etkisi (Sinterleme sıcaklığı :1200 °C)



Şekil 5.29. 1200 °C sıcaklıkta 360 dakika süreyle sinterlenen numunenin kesme deneyi sonrası görüntüsü

Şekil 5.30'da verilen grafik incelendiğinde, 1250 °C sıcaklıkta süre ve ara katman kalınlığı arttıkça genel olarak kesme mukavemeti artmaktadır. Sinterleme süresi ve ara katman kalınlığı arttığında, kesme dayanımının artması literatürle benzerdir (Zhonga 2009; Jadoon 2004). Kaplama kalınlığının artmasıyla termal genleşmeden kaynaklanan hatalar azalmakta ve ara bölgede daha düzgün bir yapı oluşmaktadır (Zhonga 2009). 1250 C sinterleme sıcaklığı ve 240 dakika sinterleme süresinde kaplama kalınlığının 25 µm'den 100 µm'a çıkmasıyla kesme dayanımı % 88 artmaktadır. Bununla birlikte süre arttıkça difüzyonun da artması ara bölgede kesme mukavemetini arttırmaktadır. 1250 °C'de Sinterleme süresinin 120 dakikadan 360 dakikaya çıkmasıyla 25 µm ara katman kullanılan numunede % 364, 50 µm kullanılanda %18, 100 µm kullanılanda ise % 289 kesme dayanımı artmaktadır. 1250 °C'de elde edilen en yüksek kesme dayanımı değeri 266,5 MPa'dır. 1250 °C de ölçülen en yüksek kesme dayanımı değeri 240 dak sinterleme süresinde 100 µm Ni ara katman kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 5.30. 4340 insört kullanılan numunelerde sinterleme süresinin kesme dayanımına etkisi (Sinterleme sıcaklığı :1250 °C)

1250 °C sinterleme sıcaklığında, sürenin artmasıyla ara bölgenin kesme dayanımı da düzenli bir şekilde artmaktadır. Bu nedenle sinterleme sıcaklığının biraz daha yükseltilerek ara bölgede kesme dayanımının arttırılabileceği düşünülmüştür. 100 µm ara katman ve 4340 insört kullanılarak hazırlanan numune 1300 °C sıcaklıkta 240 dakika sinterlenmiştir. Sinterleme sonrası kesme deneyi yapılmış ve ara bölgede 290,4 MPa kesme dayanımı elde edilmiştir. Bu değer yapılan çalışmada elde edilen en yüksek kesme mukavemeti değeridir.

5.10.3. Kesme mukavemeti bakımından insörtlerin karşılaştırılması

HSS insört kullanılan numunelerde, en yüksek 114 MPa'lık kesme dayanımı elde edilirken 4340 insört kullanılan numunelerde ise en yüksek 290,4 MPa kesme dayanımı elde edilmiştir (Çizelge 5.7). İnsörtler karşılaştırıldığında 4340 insört kullanımıyla %154 oranında kesme dayanımında artış olmaktadır. Ayrıca 4340 insört kullanılarak ara bölgede en yüksek kesme dayanımı değeri 1300 °C sinterleme sıcaklığında elde edildiği için WC-Co sisteminin de mekanik özellikleri daha iyi olmaktadır.

Çizelge 5.7. Ara bölgenin kesme mukavemeti (N/mm², MPa)

Sıcaklık (°C)	İnsört	Süre (dak) Ni kalınlığı	120	St. Sapma	240	St. Sapma	360	St. Sapma
1200	4340	25 µm	36,6	6,5	86,15	8,4	57,55	4,6
		50 µm	83,1	9,6	140,2	6,7	112,65	4,8
		100 µm	68,6	3,2	90,7	9,3	39,2	3,1
	HSS	25 µm	37	4,6	27	6,7	23	3,8
		50 µm	48	4,1	46	5,2	33,5	2,1
		100 µm	114	11,3	59	5,9	39	6,2
1250	4340	25 µm	42,3	6,9	141,6	7,8	195,5	4,8
		50 µm	170,55	11,2	178,2	7,6	202,4	12,3
		100 µm	64,8	5,6	266,5	6,5	249	8,9
	HSS	Ara bölgede birleşme sağlanamamıştır.						
1300	4340				290,4	9,3		
	HSS	İnsört eridiği için ara bölgede birleşme sağlanamamıştır.						

Kesme deneyleri sonrasında ara bölgenin mukavemeti bakımından optimum parametreler belirlenmiştir. En yüksek kesme dayanımına göre belirlenen optimum parametreler Çizelge 5.8 ‘de verilmiştir.

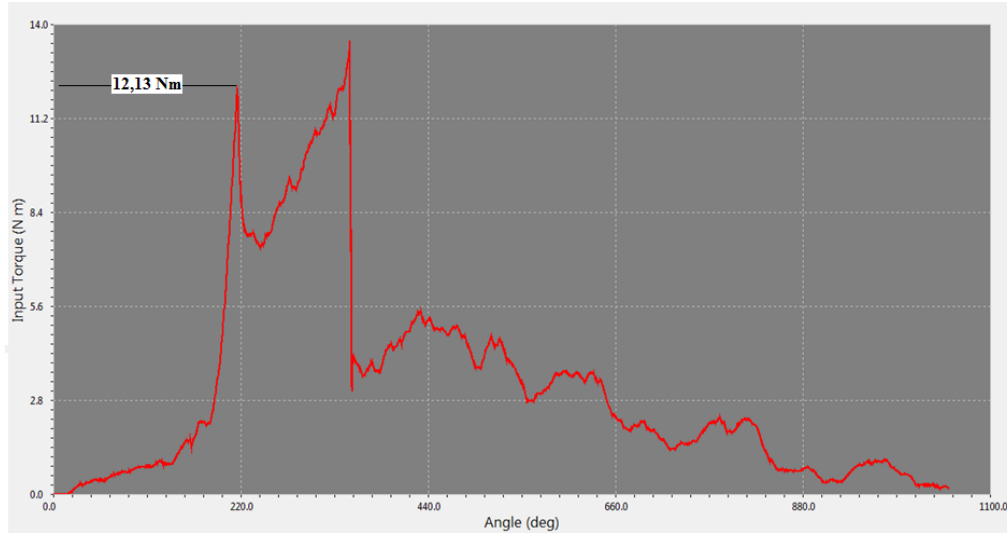
Çizelge 5.8. Optimum deney şartları

insört	Ara katman kalınlığı	Sinterleme sıcaklığı	Sinterleme süresi
4340	100 µm	1300 °C	240 dakika

5.11. Birleşme Bölgesinin Burulma Dayanımı

Kesme deneylerinde 4340 insört kullanılarak üretilen numunelerin birleşme bölgelerinin dayanımı, HSS insörtle üretilenlere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu nedenle 4340 insört kullanılarak belirlenen optimum sinterleme şartları olan 1300 °C sıcaklık ve 240 dakika bekleme süresinde üretilen numunelere burulma deneyi yapılmıştır. İnsört çapı 6,5 mm ve enjeksiyon kalınlığı 1,8 mm olan numunelerin burulma deneylerinde 12,13 ile 19,35 Nm arasında tork ölçülmüştür. En düşük tork değerine sahip numunenin burulma deneyinde elde edilen tork-burulma açısı grafiği Şekil 5.31’de verilmiştir. Burulma deneyi test cihazından elde edilen veri dosyası incelendiğinde Şekil 5.31’deki grafikte yer alan birinci pikteki tork değeri 12,13 Nm’dir. Elde edilen tork değerlerini karşılaştırmak için

literatür araştırması yapılmış ancak WC-çelik malzemeden oluşan parçanın ara bölgeisndeki burulma dayanımı konusunda bir çalışmaya rastlanamamıştır.



Şekil 5.31. Tork-burulma açısı grafiği

Kesme ve burulma deneyleri sonucunda ara bölgede yeterli dayanımın elde edilmesinin ardından üretilen numune taşlanarak İTEK T kanal çakısı haline getirilmiştir (Şekil 4.10). Üretilen takım ile işleme yapmadan önce burulma deneyleri sonucunda elde edilen en düşük tork değeri kullanılarak İTEK ile üretilmiş T-kanal frezeleme takımına uygulanabilecek maksimum kesme kuvveti değeri hesaplanmıştır (Eş. 5.1).

İTEK T kanal freze çakısıyla talaş kaldırma işleminde oluşan F_t kuvveti, takımı burulmaya zorlamaktadır (Şekil 5.32). Takımın hasar görmeden işleme yapabilmesi için F_t kuvvetinin takım üzerinde oluşturacağı tork, burulma deneyinde elde edilen 12,13 Nm'yi aşmamalıdır. F_t değeri Eş. 5.1 kullanılarak hesaplanırsa;

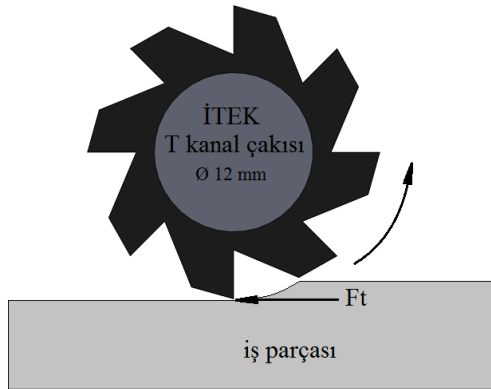
$$T = 12,13 \text{ Nm} = 12130 \text{ Nmm}$$

$r = 6 \text{ mm}$

$$T \geq F_t r \quad \Rightarrow \quad F_t \leq T / r \quad (5.1)$$

$$F_t \leq 12,13 \times 1000 / 6 \quad \Rightarrow \quad F_t \leq 2021,66 \text{ N}$$

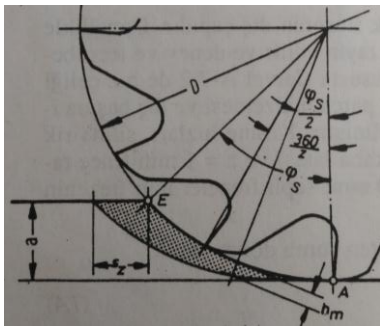
Bu hesaplamalara göre İTEK ile üretilen T-kanal frezeleme takımının maksimum 2021,6 N büyüklüğündeki Ft kuvvetine dayanabileceği belirlenmiştir.



Şekil 5.32. İşleme sırasında oluşan Ft kuvveti

5.12. Performans Testleri Öncesinde Teorik Kesme Kuvvetinin hesaplanması

Performans testleri öncesinde yeni geliştirilen takımın, Al 7075 T6 malzeme için İşleme esnasında maruz kalacağı Ft kuvveti teorik olarak hesaplanmıştır. Ft kuvveti hesaplanırken Eş. 5.2'den kesme esnasında takımın kavrama açısı, Eş. 5.3'ten ortalama talaş kalınlığı, Eş. 5.4'ten malzemenin özgül kesme kuvveti, Eş. 5.5'ten diş başına düşen Ft kuvveti, Eş. 5.6'dan parçayla temasta bulunan diş sayısı hesaplanmış ve Eş. 5.7 ile Ft kuvveti bulunmuştur. Ft kuvvetine ve takımın burulma dayanımına göre performans testleri için uygunluğu araştırılmıştır.



Şekil 5.33. Frezeleme işleminde takım ve malzeme

$$\cos \varphi_s = 1 - 2a/D = 1 - 2 \cdot 2/12 = 0,667 \quad \rightarrow \quad \varphi_s = 48,1^\circ \quad (5.2)$$

φ_s : kesme kavrama açısı

a : kesme genişliği (2 mm)

D : çap (12 mm)

$$h_m = \frac{360 \cdot f_z \cdot a \cdot \sin \varphi_s}{\pi \cdot D \cdot \varphi_s} = \frac{360 \cdot 0,05 \cdot 2 \cdot \sin 90}{3,14 \cdot 12 \cdot 48,1} = 0,0198 \text{ mm} \quad (5.3)$$

hm : ortalama talaş kalınlığı

fz : diş başına ilerleme (0.05 mm/z)

X : yanaşma açısı (90°)

Kc : özgül kesme kuvveti

$$kc = \frac{1-0,01*\gamma_0}{hm^{mc}} * kc_{1.1} = \frac{1}{(0,0198)^{0,25}} * 700 = 1866 \quad (5.4)$$

γ_0 : kesme açısı : 0°

mc: sabit sayı (Al için: 0,25)

kc1.1: özgül kesme kuvveti (Al için: 700)

$$F_{sz} = b * hm * kc = 1,7 * 0,0198 * 1866 = 62,8 \text{ N} \quad (5.5)$$

Fsz: diş başına düşen Ft kuvveti

b: kesme derinliği (1,7 mm)

$$Z_e = Z * \frac{\Phi_s}{360} = 8 * 48,1 / 360 = 1,06 \text{ diş} \quad (5.6)$$

Ze : parçayla temasta bulunan diş sayısı

Z : diş sayısı

$$F_t = Z_e * F_{sz} = 1,06 * 62,8 = 66,5 \text{ N} \quad (5.7)$$

T Kanal çakısı iki taraflı kesme yaptığı için;

$$F_t: 66,5 \times 2 = 133,1 \text{ N}$$

Ft : işleme esnasında takıma etkiyen teğetsel kuvvet

Teorik olarak hesaplanan Ft (133,1) kuvveti ile takımın karşılayabileceği maksimum teğetsel kuvvet (2021,66) karşılaştırıldığında sorunsuz olarak performans testlerinin yapılabileceği anlaşılmıştır.

5.13. Takım Performanslarının İncelenmesi

İşleme deneyleriyle, Yekpare Karbür (YK) çakı ve İTEK yöntemiyle üretilen çakının performansları kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve işleme sonrası takım ve iş parçasının görsel olarak incelenmesiyle karşılaştırılmıştır.

5.13.1. Kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü bakımından çakıların karşılaştırılması

Elde edilen kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü sonuçları Çizelge 5.9’da verilmiştir.

Çizelge 5.9. Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü sonuçları

Kesme Hızı (m/dak)	İlerlem. (mm/diş)	Kesme Kuvveti (N)					Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü, R_a (μm)				
		İTEK	St. Sapma	Yekp. Karbür	St. Sapma	Fark (%)	İTEK	St. Sapma	Yekp. Karbür	St. Sapma	Fark (%)
200	0,01	114,38	22,8	150,30	10,5	23,90	0,743	0,06	0,86	0,05	13,60
	0,025	236,23	17,2	303,18	15,7	22,08	1,654	0,11	1,436	0,04	-15,18
	0,05	226,52	27,8	272,21	17,2	16,78	1,162	0,02	1,373	0,04	15,37
300	0,01	163,69	16,2	250,11	7,4	34,55	0,719	0,04	0,786	0,05	8,52
	0,025	285,77	57,3	299,44	45,6	4,57	1,468	0,17	1,461	0,21	-0,48
	0,05	218,06	17,3	321,63	14,5	32,20	1,199	0,13	0,99	0,00	-21,11
400	0,01	196,60	6,2	376,68	18,4	47,81	0,759	0,02	0,858	0,03	11,54
	0,025	265,34	21,2	280,64	16,7	5,45	1,284	0,02	1,449	0,03	11,39
	0,05	303,24	27,4	328,11	49,9	7,58	1,041	0,04	1,047	0,07	0,57
500	0,01	171,52	19,4	298,64	30,2	42,57	0,693	0,04	0,692	0,08	-0,14
	0,025	212,83	10,8	302,20	34,0	29,57	1,589	0,03	1,603	0,02	0,87
	0,05	242,08	15,0	411,61	42,2	41,19	1,486	0,21	1,264	0,07	-17,56

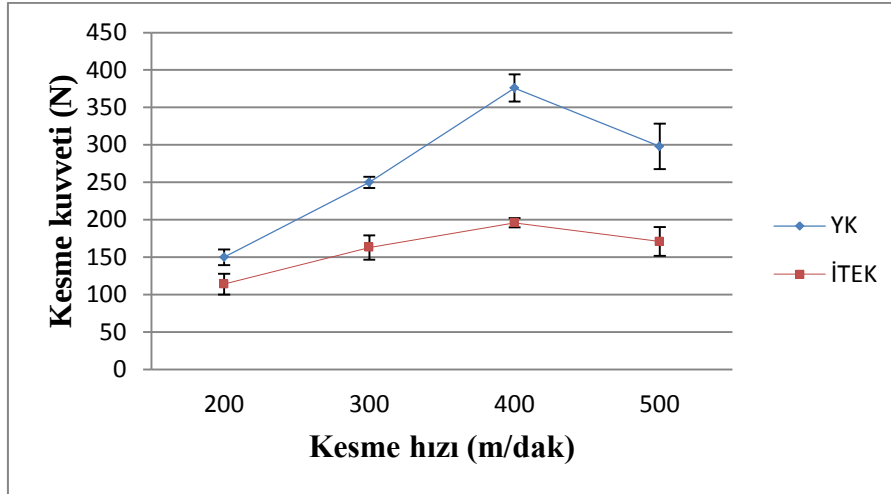
Deneylerden elde edilen verilere göre İTEK ile üretilmiş T-kanal freze çakısı için maksimum kesme kuvveti 303,24 N olarak ölçülmüştür. Burulma deneyleri sonucunda İTEK ile imal edilen T-kanal freze çakısının, 2021,66 N değerindeki yükü taşıyabileceği hesaplanmıştır. Buna göre İTEK ile üretilmiş T-kanal çakı, işleme esnasında takım üzerinde meydana gelen kesme kuvvetlerini rahatlıkla taşıyabilmektedir. Takım, difüzyon bölgesinde herhangi bir hasar olmaksızın Al 7075 malzemesini başarıyla işlemiştir.

Deneylerde en düşük kesme kuvveti İTEK T-kanal çakısıyla 200 m/dk kesme hızında 0,01 mm/diş ilerleme değeriyle yapılan deneyde 114,38 N ölçülürken yekpare karbür takımla aynı şartlarda yapılan deneyde ise 150,3 N olarak ölçülmüştür. Kesme kuvvetleri incelendiğinde İTEK yöntemiyle yeni olarak geliştirilen T-kanal çakıyla işlerken oluşan kesme kuvvetleri Yekpare Karbür takımla işlerken oluşan kesme kuvvetlerinden daha düşük çıkmıştır (Şekil 5.34). Bu sonuç, yekpare karbür çakıya göre İTEK yöntemiyle yeni geliştirilen T kanal çakının tokluğunun yüksek olmasıyla açıklanabilir. Tokluğun artmasıyla malzemenin darbe sönümleme kabiliyeti artmakta ve titreşimin azalmaktadır (Marshall ve diğerleri 1973; Kim ve diğerleri 2011). Bu nedenle İTEK yöntemiyle üretilen çakının sap kısmı 4340 çelik malzemeden olduğu için sap kısmının tokluğu daha yüksek ve buna bağlı olarak darbe sönümleme kabiliyeti de daha iyidir. Bu özellik işleme

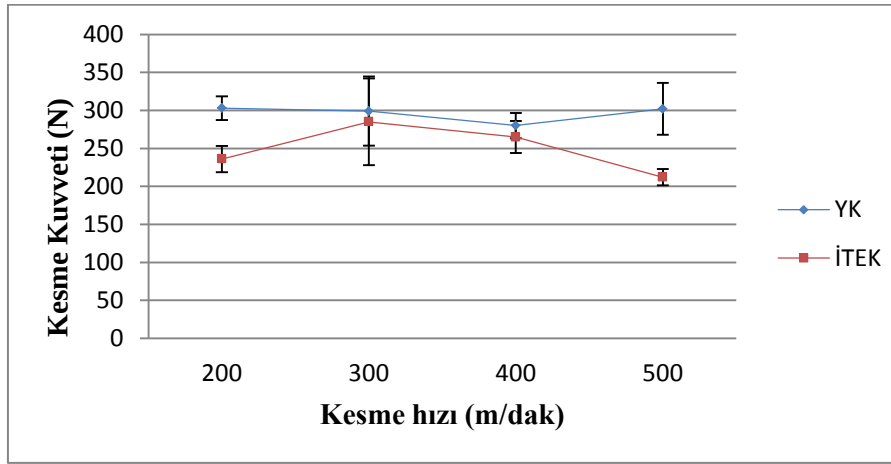
esnasında titreşimin azalmasına ve İTEK yöntemiyle üretilen çakıyla daha düşük kesme kuvvetlerinin elde edilmesine imkan sağlamaktadır. Genel olarak her iki takım için de kesme hızı arttığında kesme kuvvetleri artmaktadır. Literatürde kesme hızı arttığında kesme kuvvetlerinin azaldığı belirtilmektedir (Şeker 2009; Çakır 2000). Deneylerde kesme kuvvetlerinin yükselmesi literatürle uyuşmamaktadır. Bu durumun oluşan talaşların kanal içerisinden atılamamasıyla ve takım dişleri arasına birikmesiyle ortaya çıktığı düşünülmektedir. İşleme sonrası takımların resimlerinden her iki takımın da dişlerinin arasında talaş biriktiği görülmüştür (Resim 5.10). Kesme hızı arttıkça devir arttığı için oluşan talaş uzaklaştırılmadan çakının diş kısmıyla kanalın diğer tarafına taşınmakta ve yeniden kesilmektedir. Bu nedenle kesme hızı arttıkça kesme kuvvetleri yükselmektedir. Talaş uzaklaştırma işlemi bütün frezeleme operasyonlarında kesme kuvvetlerini ve yüzey pürüzlülüğünü etkileyen önemli bir husustur. Ancak T-kanal açılırken talaşın uzaklaştırılabileceği kanalın başlangıcı ve sonu olmak üzere sadece iki yön olduğu için bu işlem daha zor olmaktadır. Bununla birlikte işlenen malzeme alüminyum olduğu için kesiciye sıvanması kolaydır (Santos 2016). Bu nedenle çıkan talaş kesiciye yapıştığı için built up edge (BUE) oluştuğu düşünülmektedir. Buna bağlı olarak yeni çıkan talaş BUE üzerinden aktığı için kesme işlemi daha büyük kesme açısına sahip takımla yapılmış gibi bir durum ortaya çıkmakta (Stephenson 2006; Grover 2010) ve kesme kuvvetleri de yükselmektedir.

Al malzemenin işlenebilirliği konusunda yapılan çalışmalarda talaşın takıma sıvanmasını önlemek için kesme hızının yükseltilmesi gerektiği belirtilmektedir (Şeker 2009; Sandvik 1994; Lahres ve diğerleri 1997) . Bu nedenle performans testlerinde Al malzeme işlenirken talaş sıvanması ortaya çıkabileceği düşünülerek yüksek kesme hızlarında kanal açma işlemi yapılmıştır ancak yine de kesme kuvvetleri yükselmektedir (Şekil 5.34).

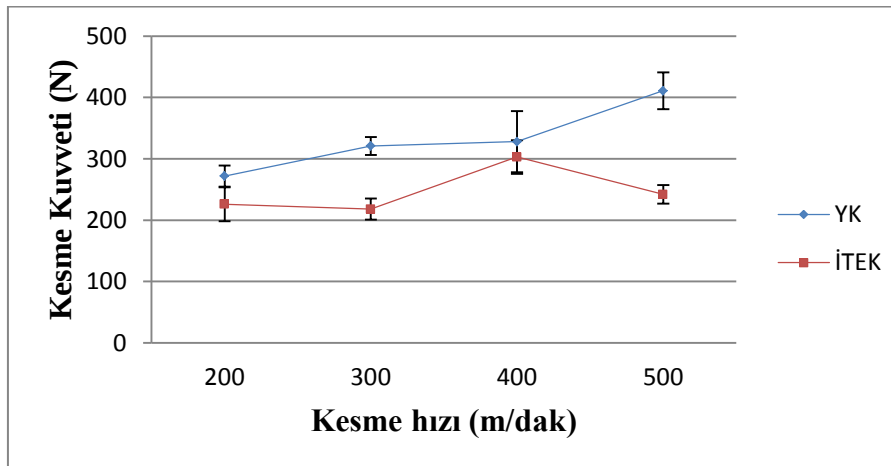
Takımlar işleme sonrası incelendiğinde yekpare karbür çakının boyun kısmında da talaş birikintisi oluştuğu görülmüştür (Resim 5.10b) ancak İTEK takımın boyun kısmında birikme yoktur (Resim 5.10a). Bu nedenle Yekpare Karbür takımın boyun kısmında oluşan talaş birikintisi de kesme kuvvetlerinin yükselmesine neden olmaktadır.



a)



b)



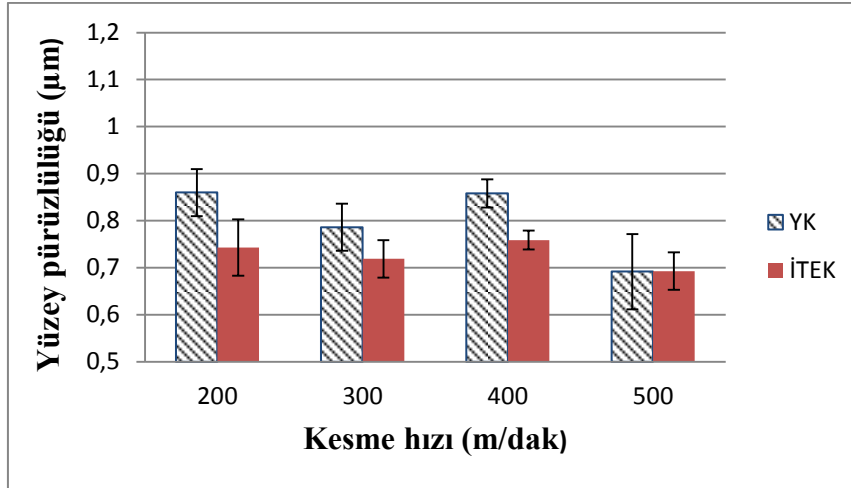
c)

Şekil 5.34. Farklı ilerleme oranlarında kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması
a) 0,01 mm/diş, b) 0,025 mm/diş, c) 0,05 mm/diş

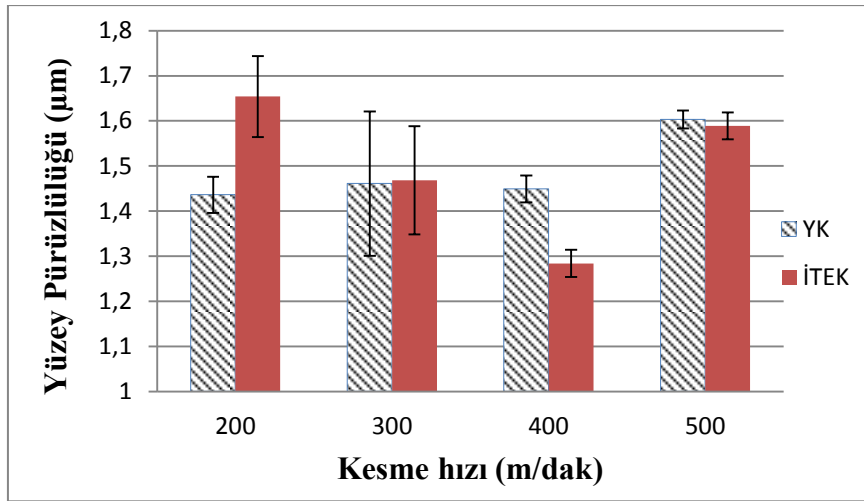
İşleme sonrası yüzey pürüzlülüğü bakımından T kanal çakılar karşılaştırıldığında 0,01 mm/diş ilerleme değerinde İTEK T-kanal çakıyla %11,22 daha düşük yüzey pürüzlülükleri elde edilmiştir (Şekil 5.35a). Yeni geliştirilen İTEK çakıyla yekpare karbür çakının geometrisi ve deney şartları aynıdır. Sadece İTEK çakının sap kısmında farklı olarak çelik malzeme kullanılmıştır. Bilindiği gibi frezeleme operasyonlarında titreşim yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde etkilemektedir (Şeker 2009; Çakır 2006; Chern 2006). Bununla birlikte birçok malzeme uygulamalarında tokluğun artmasıyla malzemenin enerji absorbe kabiliyetinin arttığı ve titreşimin azaldığı belirtilmektedir (Marshall ve diğerleri 1973; Kim ve diğerleri 2011). İTEK T kanal çakının sap kısmı çelik malzemeden imal edildiği için tokluğu daha iyi olması nedeniyle işleme esnasında İTEK çakı oluşan titreşimi yekpare karbür çakıdan daha iyi sönümlediği ve bundan dolayı da yüzey kalitesinin iyileştiği tahmin edilmektedir.

İlerlemenin yükselmesiyle yüzey pürüzlülüğü değerlerinde dalgalanmalar meydana gelmektedir (Şekil 5.35). Bu dalgalanmaların takım dişlerinde talaşın birikmesi sonucu ortaya çıktığı düşünülmektedir. Dişlerde biriken talaşlar yeniden kesilirken kanalın yüzey kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir.

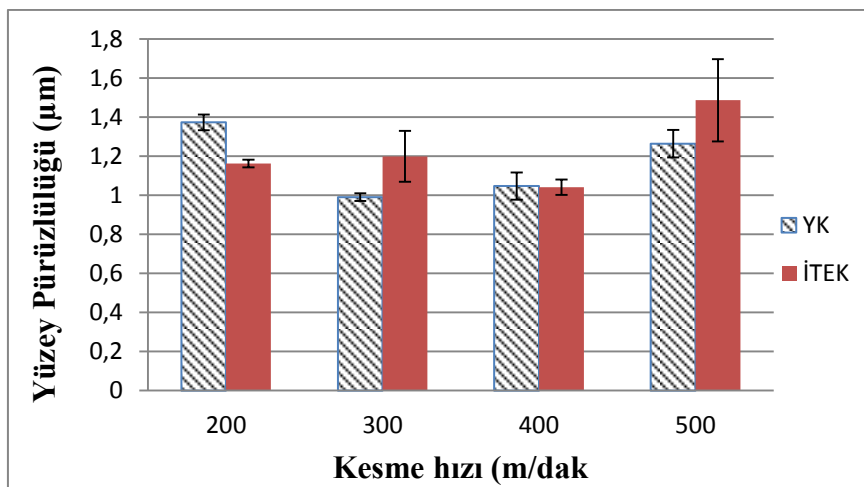
En iyi yüzey pürüzlülüğü 0,01mm/diş ilerleme değerinde elde edilmiştir. Düşük ilerleme değerlerinde yüzey pürüzlülüğünün daha düşük çıkması beklenen bir durumdur (Şeker 2009; Chern ve Chang 2006). Ancak 0,025 mm/diş ilerleme değerinde elde edilen yüzey pürüzlülüğü 0,05mm/diş değerinde elde edilen yüzey pürüzlülüğünden daha yüksektir (Şekil 35). Bu durumun talaş kesitine bağlı olarak ortaya çıktığı tahmin edilmektedir. İlerlemenin artmasıyla talaş kesiti büyümekte ve daha büyük kütleye sahip talaş oluşmaktadır (Korkut ve diğerleri 2004; Melkote 2006). Daha büyük kütleye sahip talaş santrifüj etkisiyle kesme bölgesinden daha iyi tahliye edilebildiği için yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır.



a)



b)

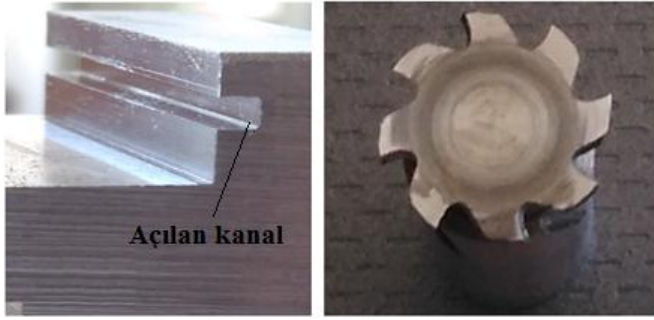


c)

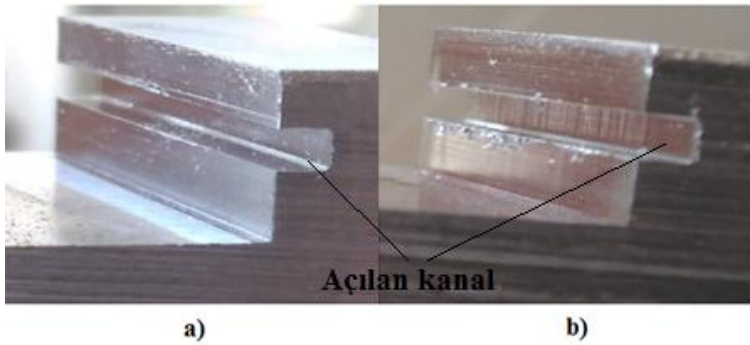
Şekil 5.35. Farklı ilerleme oranlarında yüzey pürüzlülüğünün karşılaştırılması
a) 0,01 mm/diş, b) 0,025 mm/diş, c) 0,05 mm/diş

5.13.2. İşleme sonrası takım ve iş parçasının incelenmesi

Resim 5.7 ve 5.8’de görüldüğü gibi İTEK yöntemiyle üretilen T kanal çakısıyla başarılı bir şekilde kanal açılmıştır. İşleme sonrası takım incelendiğinde (Resim 5.7) dişlerde kırık, birleşme bölgesinde ayrılma veya herhangi bir sorun ortaya çıkmadığı görülmüştür.

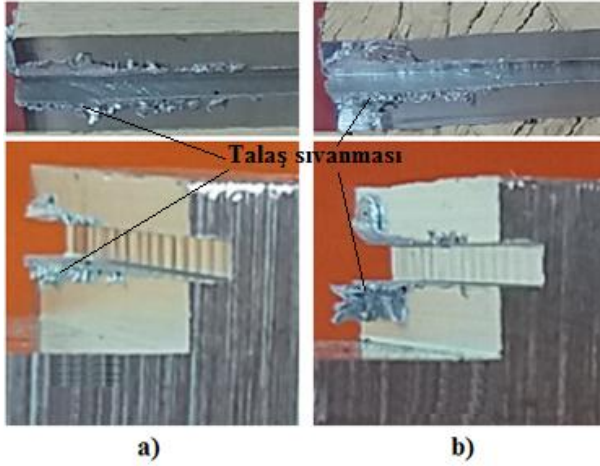


Resim 5.7. İşleme sonrası açılan kanalın ve İTEK T kanal freze çakısının resmi
($V=200$ m/dak, $f=0,01$ mm/diş)



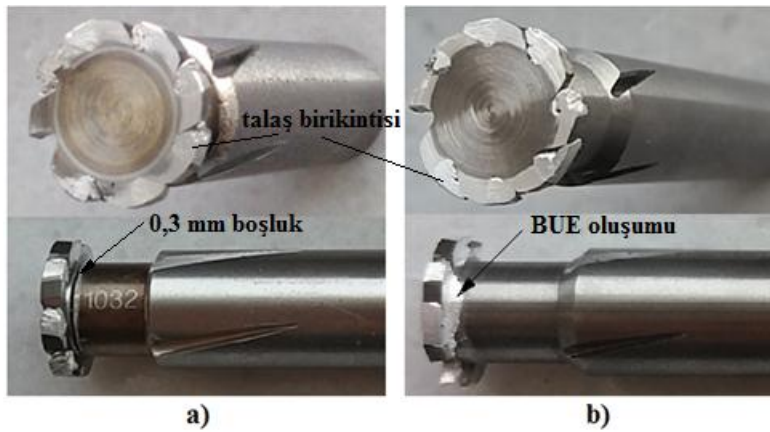
Resim 5.8. 200 m/dak kesme hızı ve 0,01 mm/diş ilerlemede açılan kanal
a) İTEK çakı, b) Yekpare Karbür T-kanal freze çakısıyla açılan

0,01 mm/diş ilerleme değerinde her iki takım da sorunsuz olarak kanal açabilmiştir. Takım dişlerinin arasına talaş biriktiğinde, kanal sonuna doğru talaş iş parçasına sıvanmaktadır (Resim 5.9). İlerleme değerinin artırılmasıyla her iki takımın dişlerinin arasında talaş birikmesi (Resim 5.10) ortaya çıkmakta ve bu durum hem kesme kuvvetlerini hem de kanal formunu etkilemektedir.



Resim 5.9. 0,05 mm/diş ilerleme değerinde açılan kanal a) İTEK, b) Yekpare karbür T kanal freze çakısıyla

T-kanal çakılar işleme sonrası karşılaştırıldığında her iki takımında da benzer şekilde talaş birikintisi ortaya çıkmaktadır. Ancak yekpare karbür T-kanal çakısının boyun kısmında da talaş birikmektedir (Resim 5.10b) ve bunun kanal formunu etkilediği Resim 5.9b’de görülmektedir. Ayrıca kesme kuvvetlerinin de bundan dolayı biraz daha yükseldiği düşünülmektedir. İTEK yöntemiyle üretilen çakıda ise böyle bir durum görülmemiştir (Resim 5.10a). İTEK T-kanal çakısının çelik sap kısmıyla, karbür kısmı arasındaki 0,3 mm’lik boşluk boğaz tarafında talaş birikimini önlemektedir.

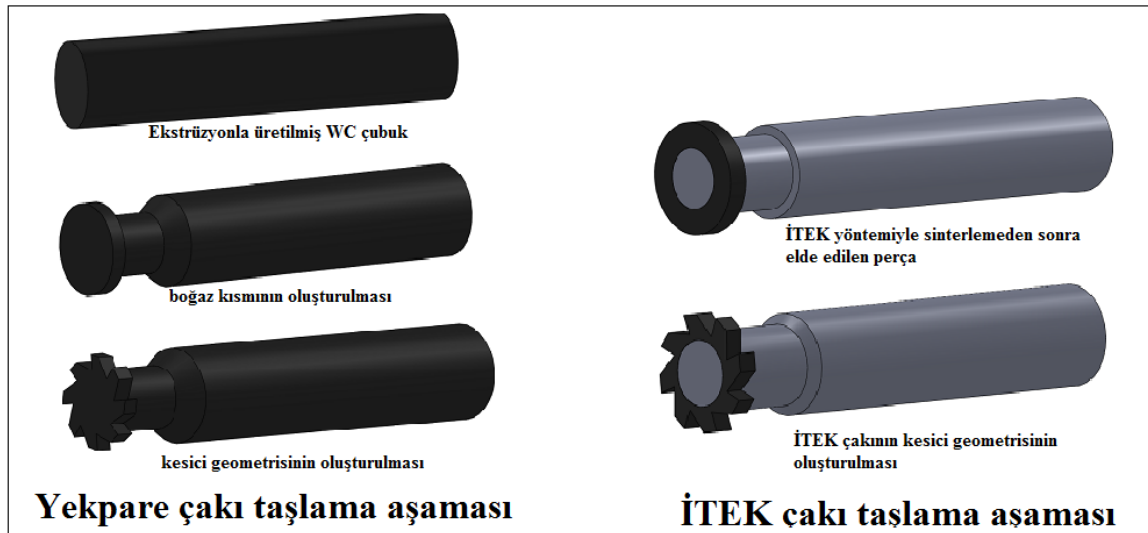


Resim 5.10. 0,05 mm/diş ilerleme değerinde yapılan işlemeden sonra T kanal çakıları a) İTEK b)Yekpare Karbür T-kanal freze çakısı)

5.14. Yekpare Karbür T Kanal Çakısıyla İTEK T Kanal Çakısının Malzeme Ve İşçilik Bakımından Karşılaştırılması

Şekil 5.36’da her iki çakının da taşlama aşaması gösterilmiştir. Yeni geliştirilen çakının kesici tarafı olan kafa kısmında profil ve kesme açılarını vermek için taşlama işlemi

yapılmıştır. Yekpare karbür çakı düz çubuktan taşlanarak oluşturulduğu için taşlama ve bileme işlemi daha fazladır. Hacimsel olarak karşılaştırıldığında İTEK çakının WC kısmından $82,3 \text{ mm}^3$ malzeme taşlanırken yekpare karbür çakının WC kısmından ise $651,9 \text{ mm}^3$ hacimde taşlama yapılmıştır. Yüzdesel olarak hesaplandığında ise İTEK çakıdan taşlanan WC malzeme miktarı %87,42 daha azdır. Bununla birlikte kullanılan WC-Co malzeme miktarları bakımından karşılaştırıldığında İTEK yöntemiyle yeni olarak geliştirilen çakı daha avantajlıdır. Yekpare karbür çakı için kullanılan WC malzeme 96,5 gr iken İTEK çakıda kullanılan WC malzeme 3,3 gr'dır. İTEK çakıyla kullanılan WC malzeme miktarı 29,2 kat daha azdır. Bu durumda malzeme temini, maliyet ve işçilik dikkate alındığında İTEK yöntemiyle T kanal çakı üretiminin daha avantajlı olduğu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5.36. Yekpare karbür ve İTEK çakıların taşlama aşaması

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, kesen kısmı WC-%9Co sap kısmı çelik malzemeden oluşan, kompozit T kanal freze çakısı İTEK yöntemiyle üretilmiş ve sonrasında işleme deneyleri yapılarak yekpare karbür T kanal çakıyla performansı karşılaştırılmıştır.

6.1.1. T Kanal Çakısı Üretimi Ve İşleme Performansı İçin Elde Edilen Sonuçlar

- İTEK yöntemiyle T kanal freze çakısının imalatı başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.
- Burulma deneylerinde elde edilen en düşük tork değerine (12.13 Nm) göre hesaplandığında İTEK T kanal çakısının maksimum 2021,6 N büyüklüğündeki kesme yüküne dayanabileceği belirlenmiştir.
- İTEK T kanal çakısı üretiminde 1300 °C sıcaklıkta 240 dakika sinterleme süresinde elde edilen WC-Co'nun sertlik değeri 1679 HV'dur. Bu değer kesici takım uygulaması için yeterli düzeydedir
- İTEK yöntemiyle yeni geliştirilen çakıyla Al7075 malzemeye sorunsuz olarak kanal açılabilmiştir. İşleme sonrası İTEK çakıda herhangi bir hasar gözlenmemiştir. Kesme deneylerinde İTEK takımla ölçülen en yüksek kesme kuvveti 303,24 N olarak ölçülmüştür.
- 0,01 mm/diş ilerleme değerinde yekpare çakıya göre daha düşük yüzey pürüzlülükleri elde edilmiştir. Diğer ilerleme değerlerinde her iki çakıyla da daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.
- İTEK takımın taşlama işlemleri yekpare karbür takımdan daha azdır. Taşlanan malzeme hacmi hesaplandığında İTEK çakıdan taşlanan WC malzeme miktarı %87,42 daha azdır. Yekpare çakıya göre imalat işlemleri azalmış ve maliyeti düşmüştür.
- Yekpare karbür çakı için kullanılan WC malzeme 96,5 gr iken İTEK çakıda kullanılan WC malzeme 3,3 gr'dır. İTEK çakıyla kullanılan WC malzeme miktarı 29,2 kat daha azdır.
- Elde edilen sonuçlar malzeme temini, maliyet, işçilik ve takım performansı bakımından İTEK yöntemiyle T kanal çakı üretiminin daha avantajlı olduğunu ortaya çıkarmaktadır.

6.1.2. Ara Katman Kullanımı İçin Elde Edilen Sonuçlar

- Nikel ara katman kullanıldığında HSS ve 4340 insörtlerle enjekte kısım arasında daha iyi birleşme sağlanmıştır. Hatta 4340 insörtle enjekte kısım arasında 100 μm Ni ara katman kullanıldığında direk olarak parça üretimine göre ara bölgenin kesme mukavemeti 3 kattan daha fazla artmaktadır.
- 25 μm ve 50 μm Ni kaplanmış bazı numunelerde WC tarafında çatlamlar meydana gelmiştir. Ancak 100 μm Ni ara katman kullanılan numunelerde çatlama olmadan ara bölgede düzgün bir yapı elde edilmiştir.
- 1250 °C'de 240 dak sinterlemeden sonra 100 μm Ni ara katmanın kalınlığı artarak 160 μm olmuştur.
- Bakır ara katman sinterleme sıcaklığında eriyerek enjekte kısmın kaymasına neden olmuştur

6.1.3. 4340 İnsört Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar

- Deneylerde en iyi kesme dayanımı 4340 insört ve 100 μm Ni ara katman kullanılarak 1300 °C sıcaklıkta 240 dk süre de sinterlenen numunelerde (290,4 MPa) elde edilmiştir
- 4340 insört kullanılarak üretilen numunelerin ara bölgesinde daha düzgün ve mukavemetli bir yapı elde edilmiştir.
- Sinterleme sonrasında 4340 insörtle enjekte kısım arasında Ni katman kullanılmadan birleşme elde edilmiştir. Ancak ara bölgede ayrılmalar ve çatlamlar meydana gelmiştir.
- Ni ve 4340 malzemelerin ara yüzeyinde birleşme difüzyonla Ni ve WC ara yüzeyinde ise daha çok infiltrasyonla gerçekleşmektedir.

6.1.4. HSS İnsört Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar

- 1300 °C sıcaklıkta yapılan sinterlemede HSS insört ergimektedir.
- HSS malzeme 1250 °C sinterleme sıcaklığında ergimemektedir ancak yumuşadığı için enjekte bölgenin baskılaması sonucu çapı 6,45 mm'den 6,2 mm'ye küçülmekte ve arada difüzyon için yeterli basınç oluşmamaktadır. Bu durumda birleşme olmadığı için soğuma sonrası WC ve insört arasında boşluk oluşmaktadır.
- HSS insört kullanılan numunelerde 1200 °C sinterleme sıcaklığında birleşme bakımından daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

- 1250°C sıcaklıktaki bazı deneylerde ara katman kullanılsa bile birleşme sağlanamamıştır.
- HSS insört kullanılan numunelerde 1200 °C sinterleme sıcaklığında süre arttıkça difüzyon bölgesinde kesme mukavemeti azalmaktadır.

6.2. Öneriler

- Bu yöntemle T kanal freze çakısından farklı kesici takımlar üretilebilir.
- HSS ve 4340 çelik malzemelerden farklı insörtlerin kullanımı araştırılabilir.
- Ara bölgenin kesme dayanımını arttırmak için farklı ara katman malzemelerinin İTEK yönteminde kullanımı araştırılabilir.
- Yekpare karbür çakının boğaz kısmında talaş birikmesini önlemek için İTEK T kanal çakısına benzer olarak boğaz kısmına küçük bir kanal açılabilir.
- İTEK yöntemiyle üretilen çakıyla Al 7075 T6'dan farklı malzemeler üzerinde takım performansı araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Ahn, S., Chung, S.T. Atre, S.V. Park, S.J. and German, R.M. (2008). Integrated filling, packing, and cooling CAE analysis of powder injection molding parts. *Powder Metallurgy*, 51 (4) 318–326.
- Akkoca, O. (1994). *Seramik Birleştirme Teknolojisi ve Yapısal Seramiklerin Lehimlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Akkurt, M. (1992). *Talas Kaldırma Yöntemleri Ve Takım Tezgahları* (Birinci baskı). Türkiye: Birsan Yayınevi, 42-47.
- Allibert, C.H. (2001). Sintering features of cemented carbides WC-Co processed from fine powder. *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 19, 53-61.
- Askeland, D.R. (1993). *Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri*. (Çev. M. Erdoğan), Ankara: Nobel Yayın Dağıtım, (Birinci baskı), 50-120.
- Aydın, M. (2008). Gözenekli Seramik Malzeme ile Paslanmaz Çeliğin Difüzyon Kaynak Yöntemiyle Birleştirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(3), 595-599.
- Baojun, Z., Xuanhui, Q. and Ying, T. (2002). Powder injection molding of WC–8%Co tungsten cemented carbide. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 20, 389–394.
- Barrena, M.I., Gomez J.M. and Matesanz L. (2010). Interfacial microstructure and mechanical strength of WC–Co/90MnCrV8 cold work tool steel diffusion bonded joint with Cu/Ni electroplated interlayer. *Materials and Design*, 31,3389–3394.
- Barrena, M.I., Gomez J.M., Merino N. and Matesanz L. (2008). Characterization of WC–Co/Ti6Al4V diffusion bonding joints using Ag as interlayer. *Materials characterization*, 59, 1407–1411.
- Berber, M. (2005). *Toz Enjeksiyon Kalıplama ile Steatitten Üretilmiş Parçaların Sinterleme Davranışlarının Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 8-67.
- Brookes, K. J. A. (1996). *World Directory and Handbook of HardMetals and Hard Materials*. Sixth Edition, UK: International Carbide Data, 23-26.
- Buytoz, S. (1999), *Al₂O₃ Takviyeli Kompozit Malzemelerin Katı Hal Birleştirme Tekniği ile Kaynak Edilebilirliğinin Arastırması*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üni. Fen Bilimleri Enst. Elazığ, 35-50.
- Cakır, C. (2000). *Modern metal cutting principles* (İkinci baskı). Bursa: Vipaş, 216-285.
- Callister, W. D. (2007). *Materials Science and Engineering* (Seven edition). New York: John Wiley & Sons, Inc., 142-150.

- Canaran, M. (2002). *Mekanik alaşımlamanın volfram ağır alaşımlarının yüksek sıcaklık sinterleme davranışlarına olan etkilerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 61-75.
- Carter, B.C. and Norton, M.G. (2007). *Ceramic Materials Science and Engineering* (First edition). New York: Springer, 427-461.
- Chen, H., Feng K., Wei S., Xiong J. and Guo Z. (2012). Hui Wang Microstructure And Properties Of WC-Co/3Cr13 Joints Brazed Using Ni Electroplated Interlayer. *Nt. Journal Of Refractory Metals And Hard Materials* 33, 70–74
- Chen, H., Feng K., Xiong J. and Guo Z. (2013). Characterization And Stress Relaxation Of The Functionally Graded Wc-Co/Ni Component/Stainless Steel Joint. *Journal Of Alloys And Compounds* 557, 18–22.
- Cheng, Y., Sun S and Hu H. (2014). Preparation of Al₂O₃/TiC micro composite ceramic tool materials by microwave sintering and their microstructure and properties. *Ceramics International* 40, 16761–16766.
- Chern, G, and Chang Y. (2006). Using two-dimensional vibration cutting for micro-mill international. *J Mach Tools Manuf*, 46, 659–666.
- Cura, M.E. (2002). *Sıcak Preslenmiş WC-Co/B₄C Kompozitlerinin Mekanik, Manyetik Ve Mikroyapısal İncelenmesi*. Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 5-40.
- Çakır, M. C. (1999). *Modern Talaşlı İmalatın Esasları* (Birinci baskı). Bursa: Uludağ Üniversitesi Güçlendirme Vakfı, 2-17.
- Çaydaş, U. ve Çelik M. (2017). AA 7075-T6 alaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, takım sıcaklığı ve ilerleme kuvvetine etkilerinin araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 20 (2) : 419-425.
- Çelik, S. (1996). *Koruyucu Gaz Altında Saf Alüminyum Ve Bakırın Difüzyon Kaynağı Şartlarının Belirlenmesi*. Doktora Tezi, Balıkesir Üni. Fen Bil. Enst., Balıkesir, S.14-25,47.
- Heaney, D. F., Suri P. and German R. M. (2003). Defect-Free Sintering Of Two Material Powder Injection Molded Components. *Journal Of Materials Science* 38, 4869 – 4874.
- Değer, S. (1994). *Kıymetsiz Metal-Seramik Bağlantısını Etkileyen Faktörler Üzerine Çalışmalar*. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, 28-39.
- Earle, M. J. (2007). *Material Reference Book* (First edition). Los Angeles, 126-128.
- Edirinsinghe, M.J. and Evans, J.R.G. (1986). Fabrication of Engineering Ceramics by Injection Moulding. *International Journal of High Technology Ceramics*, 2 (1), 1-31.

- Eksi, A.K. and Yüzbaşıoğlu, A.H. (2005). Sintering Of Cold Isostatically Pressed Metallic Powder. *4th International Powder Metallurgy Conference*, Sakarya, 406-414.
- Erdoğan, M., Erol A. ve Yönetken A. (2013). WC-Co Esaslı Çizici Kalem Karakterizasyonu ve Mekaniksel Özellikleri. *AKU J. Sci. Eng.* 13, 025701 (1-11).
- Eso, O., Fang, Z. and Griffo, A. (2005). Liquid phase sintering of functionally graded WC-Co composites. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 23, 233–241.
- Fabijanić T.A., Alar Z. and Ćorić D. (2015). Influence Of Consolidation Process And Sintering Temperature On Microstructure And Mechanical Properties Of Near Nano- And Nano-Structuredwc-Co Cemented Carbides. *Int. Journal Of Refractory Metals And Hard Materials* 54, 82–89.
- Fayyaz, A., Muhamad, N., Sulong, A. B., Rajabi, J. and Wong, Y. N. (2014). Fabrication of cemented tungsten carbide components by micro-powder injection moulding. *Journal of Materials Processing Technology*, 214, 1436–1444.
- Fernandes, C.M. and Seno, A.M.R. (2011). Cemented carbide phase diagrams: a review. *Int J Refract. Met. Hard. Mater.*, 29:405–18.
- German, R., M. (1990). *Powder injection molding* (First edition). New Jersey: Metal Powder Industries Federation, 349-420.
- German, R., M. and Hens, K. F. (1991). Key issues in powder injection molding. *Ceramic Bulletin*, 70 (8), 1294-1302.
- German, R.M. and Bose, A. (1997). *Injection Molding of Metals and Ceramics* (First edition). New Jersey: Metal Powder Industries Federation, 5-280.
- German, R.M. (1998). *Powder Injection Molding*. In *ASM Handbook: Powder Metal Technologies and Applications*, 7: 831–851.
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentals of modern manufacturing materials processes, and systems* (4 th Ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc., 135-146.
- Grover, M. P. (2010). *Principles of Modern Manufacturing* (4 th Ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc. 89-78.
- Guo, J., Koopman M., Fang Z.Z., Wang X., Fan P. and Rowe M.C. (2013). Measurements of compositional gradients in cemented tungsten carbides. *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 36, 265–270.
- Guo, Y., Wang Y., Gao B., and Yuan Z. (2016). Rapid diffusion bonding of WC-Co cemented carbide to 40Cr steel with Ni interlayer: Effect of surface roughness and interlayer thickness. *Ceramics International*, 42, 15, 16729-16737.
- Gül, S. (1996). *Asidik Çözeltilerden saf volframoksit üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 18-35.

- Güleç, S. ve Aran A. (1993). *Malzeme Bilgisi 1* (İkinci baskı). İstanbul: İ.T.Ü yayınları, 34-40.
- Gülsoy, H.Ö., Özbek, ve S., Salman, S. (2004). Bi Metalik Parçaların Toz Enjeksiyon İle Üretilmesi. *Metal Dünyası*, 131,109-114.
- Haglund, S., and Agrsen J. W. (1998). Content in Co binder during sintering of WC-Co *Acta. Mater.* 46(8):2801-7.
- Hao, H. (1995). The effect of interlayer metals on the strength of alümina ceramic and 1Cr18Ni9Ti stainless steel bonding. *Journal of Materials Science*, 30, 4107-4111.
- He, M. Y. and Evans A.G. (1991). The Strength And Fracture Of Metal/Ceramic Bonds. *Acta Metall, Mater.* 39,7, 1587-1593.
- Heaney, D.F. (2012). *Handbook of metal injection molding* (First edition). Philadelphia New Delhi: Wood Head Publishing, 50-182.
- Heng, S.Y., Muhamad N., Sulongn A. B. , Fayyaz A. and Amin S. M. (2013). Effect Of Sintering Temperature On The Mechanical And Physical Properties Of Wc-10%Co Through Micro-Powder Injection Molding. *Ceramics International* 39, 4457-4464.
- Heng, S.Y., Muhamad, N., Sulongn, A.B., Fayyaz, A., Yulis, S., and Amin, M. (2013). Effect of sintering temperature on the mechanical and physica lproperties of WC-10% Co through micro-powder injection molding(mPIM). *Ceramics International*, 39, 4457-446.
- Heo, Y. M., Kim, G. H., Chang, S.H. and Lee, G. A. (2012). Study on the low energy & pollution manufacturing of micro cutting tools by powder injection molding process. *Journal of Physics: Conference Series*, 379(012030), 1-9.
- Hidnert, P. (1937). Thermal Expansion Of Cemented Tungsten Carbide. Part Of Jot. Rnal of Research of The National Bureau Of Standards. 18.
- Huh, D., and Kim D. H. (1997). Ceramic materials. *J. Mater. Res.* 12, 4, 1048-1055.
- Hüseyinoğlu, M., ve Tosun N. (2009). 7075 Al Alaşımının Frezelenmesinde Minimum Soğutma Sıvısının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi. 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, Türkiye.
- İpekçioğlu, N. (1984). *Frezecilik*. Milli Eğitim Basımevi. İstanbul, 8-107.
- Jadoon, A.K., Ralph B., and Hornsby, P.R. (2004). Metal To Ceramic Joining Via A Metallic İnterlayer Bonding Technique. *Journal Of Materials Processing Technology*, 152, 257-265.
- Jewett, T., and Bard, T. (2015). Macro-contamination induced defects in ready to press WC-Co grade powder. *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 53, 123-133.

- Jiang, C., Chen H., Wang Q., and Li Y. (2016). Effect of brazing temperature and holding time on joint properties of induction brazed WC-Co/carbon steel using Ag-based alloy. *Journal of Materials Processing Technology* 229, 562–569.
- Johnson, J. L., Tan, L. K. Suri, P., and German, R. M. (2003). Design Guidelines For Processing Bi-Material Components Via Powder-Injection Molding. *Powder Materials*, 30-34.
- Karataş, Ç. (1997). *Toz Enjeksiyon Kalıplamada Karışımın Reolojisi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Ankara, 30-85.
- Karataş, Ç., ve Sarıtaş, S. (1998). Toz enjeksiyonla kalıplama: Bir ileri teknoloji imalat metodu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 13 (2): 193-228.
- Kejanlı, H. (2009). Ti51ni49 Kompozitinin Cu-Ni Ara Tabakalı Difüzyon Kaynağında Sıcaklık Ve Sürenin Birleşmeye Etkisinin Araştırılması. *E-Journal Of New World Sciences Academy*, 4, 2.
- Kim, J.H. and Yoo Y.C. (1998). Microstructure and structure of Ni-Cr steel/Si₃N₄ joint brazed with Ag-Cu-Zr alloy. *Journal of Materials Science and Technology*, 14, 352-356.
- Kim, S. S., Hwang, H. J., Shin, M. W., and Jang, H. (2011). Friction and vibration of automotive brake pads containing different abrasive particles. *Wear*, 271, 1194-1202.
- Ko, T. J., Kim, J. H. and Yoon, I.J. (2009). A Study of WC End-milling Manufacturing and Cutting Ability Evaluation by Using Powder Injection Molding. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 10(4), 13-17.
- Konyashin, I., Hlawatschek S., Ries B., Lachmann F., Dorn F., Sologubenko A., T. and Weirich T. (2009). On the mechanism of WC coarsening in WC–Co hardmetals with various carbon contents. *Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 27, 234–243.
- Konyasin, I., Reis, B., and Lachmann, F. (2010). Near-nano WC-Co cemented carbides: will they substitute conventional coarse-grained mining grades. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 28, 489–497.
- Korkut, İ., Kasap, M., Çiftci, İ., ve Şeker, U. (2004). Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel. *Materials Design*, 25, 124-132.
- Kurt, A. (1996). *Toz Metalden Üretilen Bronz Yatağın Düşük Karbonlu Çeliğe Difüzyon Kaynağı ile Birleştirilmesi*. Doktora Tezi, Fırat Üni. Fen Bilimleri Enst. Elazığ, 25-48.
- Kurt, A., Uygur, İ., and Ateş, H. (2007). Effect of Temperature on Weldability of Powder Metal Parts Joined by Diffusion Welding. *Materials Science Forum*, 546-549(667-670).

- Kurt, O., ve Erdoğan M. (2003). CNC Freze Tezgâhlarında Yüzey Pürüzlülüğüne Etki Eden Faktörlerin Belirlenmesi. 3. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Ankara, 317-329.
- Lahres, M, Miiller-Hummel P, and Doerfel O. (1997). Applicability of different hard coatings in dry milling aluminium alloys. *Surf Coat Technol* 91, 116–121.
- Lassner, E. and Schubert, W.D. (1999). *Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys, and Chemical Compounds* (First edition). New York: Kluwer Academic/Plenium Publishers, 125-132
- Lee, W.C. (1996). Joining of Nickel based Inconel 600 alloy to alümina using Ag-Cu-Ti alloy and soft metals. *Journal of Materials Science and Technology*, 15, 29-31.
- Li, T., Li, Q., Fuh, J.Y.H., Ching, Yu, P. and Lu, L. (2009). Two-Material Powder Injection Molding Of Functionally Graded Wc–Co Components. *Internarional Journal Of Refractory Metals And Hard Materials*, 27, 95-100.
- Lin, D., Xu J., Shan Z., Chung S.T., and Park S.J. (2015). Fabrication of WC-Co Cutting Tool by Powder Injection Molding. *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*, 16, (7), 1435-1439.
- Liu, W., Yang, X., Xie, Zh. and Jia, C. (2012). Novel fabrication of injection moulded ceramic parts with large section via partially water debinding method. *Journal of the European Ceramic Society*, 32, 2187-2191.
- Liu, Z., Y., Loh, N., H., Tor, S., B., and Khor, K., A. (2003). Characterization of powder injection molding feedstock. *Meterials Characterization*, 49, 313-320.
- Marshall, G. P. Williams, J. G. and Turner, C. E. (1973). Fracture toughness and absorbed energy measurements in impact tests on brittle materials. *Journal Of Materials Science*, 8, 949-956.
- Martinelli, A.E. (1996). Diffusion bonding of silicon carbide and silicon nitride to molybdenum. *Materials and Design*, 22, 483-489.
- Melkote, S.N., Ng CK, Rahman M, and Kumar A. (2006). Experimental study of micro- and nano-scale cutting of aluminum 7075-T6. *Int J Mach Tools Manuf*, 46, 929–936.
- Merchar, J., R. (1990). Overview of metal injection molding. *Metal Powder Report*, 5, 345-354.
- Milli Eğitim Bakanlığı (2011). *MEGEP lehimleme ders notu* (birinci baskı). Ankara: MEGEP, 25-49.
- Nebiler, İ. (2005). *İmalat İşlemleri* (ikinci baskı). Manisa: Emek Matbaacılık & Yayıncılık, 57-85.

- Oğulcu, F., (2006). *Toz Enjeksiyon Kalıplamada Besleme Stoğunun Akıcılığına İşlem Parametrelerinin Etkisi*. Yüksek Lisans, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-34.
- Oğuz, B. (1988). *Sertlehimleme* (Birinci baskı). İstanbul: Oerlikon Yayınları, 38-46.
- Heitjans, P. and Karger, J., E. (2005). *Diffusion in condensed matter: Methods, Materials, Models* (Second edition). Berlin: Birkhauser, 1-965.
- Petersson, A. (2004). Sintering shrinkage of WC-Co and WC-(Ti,W)C-Co materials with different carbon contents. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 22, 211–217.
- Pötschke, J., Säuberlich T., Vornberger A., and Marktscheffel J.A. (2018). Solid state sintered nanoscaled hardmetals and their properties. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 72, 45–50.
- Prince, A., and Okamoto, H. (1995). *Handbook of ternary alloy phase diagrams* (First edition). Ohio: ASM International, 158-198.
- Qu, X., Gao J., Qin M., and Lei C. (2004). Rheologic Behaviors And Pim Processing Of Wc-Tic-Co Powder Feedstock. *Journal Of University Of Science And Technology Beijing*, 11 (4), 334.
- Rodelas, J., Hilmas G., and Mishra R.S. (2009). Sinterbonding Cobalt-Cemented Tungsten Carbide To Tungsten Heavy Alloys. *Int. Journal Of Refractory Metals & Hard Materials* 27, 835–841.
- Ruh, A., Dieckmann, A.-M., Heldele, R., Piotter, V., Ruprecht, R., Munzinger, C., Fleischer, J. and Haußelt, J. (2008). Production of two-material micro-assemblies by two-component powder injection molding and sinter-joining. *Microsystem Technologies*, 14, 12, 1805.
- Zhang, S.X., Ong, Z.Y., Li, T., Li, Q.F. and Pook S.F. (2010). Ceramic Composite Components With Gradient Porosity By Powder Injection Moulding. *Materials And Design* 31, 2897–2903.
- Safarian, A. (2015). *Toz Enjeksiyon Kalıplama Yönteminde İnsört Kullanarak Büyük Hacimli Parçaların Üretiminin Araştırılması*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1-3.
- Safarian, A., and Karataş, Ç. (2014). The investigation of the effect of injection velocity on defects caused in thick components fabricated by metal injection molding. *7th International Powder Metallurgy Conference and Exhibition*, Ankara.
- Safarian, A., Subaşı, M., and Karataş, Ç. (2015). Reducing debinding time in thick components fabricated by powder injection molding. *International Journal of Materials Research*, 106, 5, 527-531.

- Sandvik Coromant (1994). *Modern Metal Cutting – A Practical Handbook* (English Edition), Sweden: Sandvik Coromant, 1-3.
- Santella, M.L. (1992). Tecnical ceramics. *American Ceramic Society Bulletin*. 71,6-8.
- Santos, M.C., Machado, A.R., Sales, W.F., Barrozo, M.A.S. and Ezugwu, M.O. (2016). Machining of aluminum alloys : A review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 86, (9), 3067–3080 .
- Sarıtaş, S., Türker, M., ve Durlu, N. (2007). *Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri* (Birinci baskı). Ankara: Türk Toz Metalurjisi Deneği, 5-83.
- Savaşkan, T. (1999). *Malzeme Bilgisi ve Muayenesi* (Beşinci baskı). Trabzon: Derya Kitabevi, 128-157 .
- Sayyedain S.S., Salimijazi H.R., Toroghinejad M.R., and Karimzadeh F. (2014). Microstructure And Mechanical Properties Of Transient Liquid Phase Bonding Of Al₂O₃/Al Nanocomposite Using Copper Interlayer. *Materials And Design* 53 275–282.
- Schwartz, M. M. (1990). *Ceramic Joining* (Birinci baskı). Ohio: ASM International 12-18.
- Sekmen, M , Günay, M , ve Şeker, U. (2015). Alüminyum Alaşımlarının İşlenmesinde Kesme Hızı ve Talaş Açısının Yüzey Pürüzlülüğü, Yığıntı Talaş ve Yığıntı Katmanı Oluşumu Üzerine Etkisi. *Politeknik Dergisi* 18, 141-148.
- Simchi A. and Petzoldt F. (2010). Cosintering of Powder Injection Molding Parts Madefrom Ultrafine WC-Co and 316L Stainless Steel Powders for Fabrication of Novel Composite Structures. *Metallurgical And Materials Transactions*, V 41A, 234.
- Sommer, F., Kern, F. and Gadow, R. (2013). Injection molding of ceramic cutting tools for wood-based materials. *Journal of the European Ceramic Society*, 33, 3115–3122.
- Stephenson, D. A., and Agapiou, J.S. (2006). *Metal Cutting Theory and Practice*. (Second Edition). Boca Raton : Taylor&Francis group, 153-176.
- Sugiyama, Mizumukai Y., Taniuchi T., and Okada K. (2015). Carbon content dependence of grain growth mode in VC-doped WC–Co hardmetals. *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 52, 245–251.
- Sun, Y., Su W., Yang H., and Ruan J. (2015). Effects of WC particle size on sintering behavior and mechanical properties of coarse grained WC–8Co cemented carbides fabricated by unmilled composite powders. *Ceramics International*, 41, 14482–14491.
- Sung, H.J, Yoon T. and Ahn S. (1999). Application of PIM for Manufacturing WC-Co Milling Inserts. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, 46, 8.

- Şahin, Y. (2000). *Talaş kaldırma prensipleri II* (Birinci baskı). Ankara: Nobel Yayınevi, 35-42.
- Şeker, U. (2009). *Takım Tasarımı* (Birinci baskı). Ankara: Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, 1-133.
- Tan, L.K., Baumgartner R., and German R.M. (2001). Powder Injection Molding Of Bi-Metal Components. *Advances In Powder Metallurgy And Particulate Materials*, 4, 191–198.
- Turan, E. (2010), *Alümina Takviyeli Al-Fe-V-Si Kompozitlerinin Reolojik Özelliklerinin ve Toz Enjeksiyon İle Kalıplanabilirlik Parametrelerinin Araştırılması*. Yüksek Lisans, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 45-60.
- Turgut, Y. (2007). *Bağlama Kalıplarında Bağlama Kuvvetlerinin Hesaplanmasında Kullanılan Emniyet Katsayılarının Deneysel Olarak İncelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 40-52.
- Uhrenius, B., Pastor, H. and Pauty, E. (1997). Cementit carbides. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 15, 139–49.
- Upadhyaya, G.S. (2001). Materials science of cemented carbides - an overview, *Materials and Design*, 22 483-489.
- Upadhyaya, G. S. (1998). *Cemented Tungsten Carbides: Production, Properties, and Testing* (First edition), New Jersey: Noyes Publications, 25-37.
- Upadhyaya, G. S. (2000). *Sintered Metallic and Ceramic Materials, Preparation, Properties and Applications* (First edition), New York :John Wiley and Sons, Inc., 5
- Uprak, Ş. (2008). *Toz Enjeksiyon Kalıplamada Su Bazlı Bağlayıcı Kullanarak Oluşturulan Süperalaşım Tozlu Besleme Stoklarından Parça Üretiminin İncelenmesi*. Yüksek Lisans, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 9-30.
- Urtekin, L. (2008). *Toz Enjeksiyon Kalıplanmış Steatit Seramiklerin Özelliklerine Kalıplama ve Sinterleme Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-22.
- Vervoort, Pj., Vetter, R., and Duszczek, J. (1996). Overview of Powder Injection Molding. *Advanced Performance Materials*, 3: 121–151.
- Wang, H., Webb T., and Bitler J.W. (2015). Study of thermal expansion and thermal conductivity of cemented WC–Co composite, *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 49, 170–177.
- Watkins, R. D. (1991). *ASM Handbook. Ceramics and Glasses*, 4,478.
- Nie, X.Y., Liu, J.C. Li, H.X., Du, Q., Zhang, J.S., and Zhuang L.Z. (2014). An Investigation On Bonding Mechanism And Mechanical Properties Of Al/Ti Compound Materials Prepared By Insert Moulding. *Materials And Design*, 63, 142–

150.

- Yücel, İ. (2007). *Toz Enjeksiyon Kalıplanmış Alüminanın Mekanik Özellikleri*. Yüksek Lisans, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 11-30.
- Zhang, j.X., Chandel R.S., and Seow H.P. (2002). Effects Of Chromium On The Interface And Bond Strength Of Metal–Ceramic Join. *Materials Chemistry And Physics*, 75, 256.
- Zhixing, G., Yi L., Hua Z., Ji X., and Weicai W. (2015). Effect Of WC On The Joint Of Ti(C,N)-Based Cermet/Steel Joint By Autogenous Pressure-Assisted Interlayer-Free Diffusion Bonding. *int. Journal Of Refractory Metals And Hard Materials*, 51, 102–109.
- Zhong, Z., Hinoki T., Jung H.C, Park Y.H., and Kohyama A. (2010). Microstructure and mechanical properties of diffusion bonded SiC/steel joint using W/Ni interlayer. *Materials and Design* 31, 1070–1076.
- Zhonga, Z., Hinokib, T., and Kohyama, A. (2009). Effect of holding time on the microstructure and strength of tungsten/ferritic steel joints diffusion bonded with a nickel interlayer. *Materials Science and Engineering A*, 518 ,167–173.
- Zhou, P., Buchegger C., Du Y., and Lengauer W. (2016). Experimental investigation and thermodynamic assessment of the C–Co–Fe–Ni–W system. *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 54, 60–69.
- Zhou, J.Z., Zhong, Z.H., and Ge, C.C. (2007). Silicon Doped Carbon/Cu Joints Based on Amorphous Alloy Brazing for First Wall Application. *Fusio Engineering and Design*, 82, 1, 35-40.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KOÇAK, Harun
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 05.08.1985, Manisa
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (332) 673 40 89
 Faks : 0 (332) 673 40 90
 e-mail : harunkocak@selcuk.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / İmalat Mühendisliği	2018
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Eğitimi	2011
Lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Eğitimi	2007
Lise	Manisa Anadolu Teknik Lisesi	2003

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2011-Halen	Selçuk Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
2008-2011	Amasya-Merzifon Havaalanı	Makine Teknisyeni

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Koçak H., Samet K., Yılmaz O., ve Karataş Ç. (2018). Nikel Ara Katman Kullanılarak İnsörtlü Toz Enjeksiyon Kalıplama Yöntemiyle WC-Co/HSS Kompozit Parça Üretiminin Araştırılması”, *Gazi Ün Fen bil. Derg. Part C*, 6, 2

Hobiler

Yüzme, Seyahat, Tasarım



GAZİ GELECEKTİR..