



An investigation of manufacturing of assembled part by using chromium interface in powder injection molding process

Oğuz Yılmaz¹, Kamran Samet¹, Harun Koçak^{2*}, Çetin Karataş¹

¹Department of Manufacturing Engineering, Gazi University, Ankara, 06500, Turkey

²Department of Machine and Metal Technology, Selcuk University, Konya, 42850, Turkey

Highlights:

- Manufacturing of spherical joint without assembly
- The effects of chromium interface on diffusion mechanism
- Clearance control on assembled part manufactured by powder injection molding process

Keywords:

- Chrome coating
- Micro-gap
- Assembled part
- PIM

Graphical/Tabular Abstract

In this study, assembled parts with spherical shaped and movable interface production were investigated by powder injection molding method using a new method. In this method, the movement of the mechanism was provided by the coated chrome interface between the components. The interior and outer part of the mechanism was produced of Ck45 steel (insert) and WC-%9Co feedstock, respectively. The interface was formed with chrome plated onto Ck45 steel. The coated Ck45 steel was placed into mold and then WC-%9Co feedstock is injected onto insert. The chemical debinding and sintering processes were applied to specimens after injection.

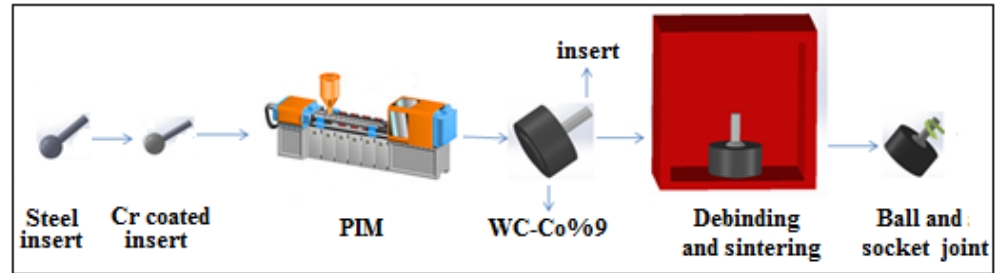


Figure A. Production method of assembled part

Article Info:

Received: 12.08.2017

Accepted: 21.03.2018

DOI:

/10.17341/gazimmfd.416519

Acknowledgement:

Aauthors thank TUBITAK

Correspondence:

Author: Harun Koçak
e-mail: h.harun.h@gmail.com
phone: +90 332 673 4089

Purpose: Obtain a gap at the steel/WC-Co interface thanks to the Cr coating for diffusion barrier

Theory and Methods: The production method of the spherically shaped assembled parts consists of three stages as seen in Figure A. In the first stage, inserts were prepared, chrome was coated on insert by electroplating in the second stage and in the third stage steps of TEK method were applied.

Results: With the increase of the sintering temperature, the gap formed in the interface becomes smaller. Gaps were respectively 30, 40 and 50 microns by the experiments that conducted at 1100 °C, 1200 °C and 1300 °C, 55, 41 and 27 microns by mathematical calculations, 55, 36 and 23 microns by finite element analysis.

Conclusion: By means of the chrome interface, the diffusion barrier was formed, the WC-Co and steel was not prevented from joining during sintering and the assembled part with three degrees of freedom was produced by the PIM method.



Toz enjeksiyon kalıplamada krom arayüzeyi kullanılarak montajlı parça imalatının araştırılması

Oğuz Yılmaz¹, Kamran Samet¹, Harun Koçak^{2*}, Çetin Karataş¹

¹Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Teknikokullar, Yenimahalle, Ankara, 06500, Türkiye

²Selçuk Üniversitesi, Cihanbeyli Meslek Yüksekokulu, Konya, 42850, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Montaja gerek duyulmadan küresel mafsal üretimi
- Krom arayüzeyin difüzyon mekanizması üzerine etkisi
- Toz enjeksiyon kalıplama ile üretilmiş montajlı parçada boşluk kontrolü

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 12.08.2017

Kabul: 21.03.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.416519

Anahtar Kelimeler:

Toz enjeksiyon kalıplama,
krom kaplama,
mikro-boşluk,
sinterleme,
montajlı parça

ÖZET

Bu çalışmada, toz enjeksiyon kalıplama yöntemi ile hareketli, küresel şekilli ve montajlı parça üretimi yeni bir yöntem kullanılarak araştırılmıştır. Bu yöntemde mekanizma hareketi, bileşenler arasında oluşturulan krom arayüzey ile sağlanmaktadır. Mekanizmanın iç kısmı Ck45 çeliğinden (insört), dış bölgesi WC-%9Co besleme stokundan üretilmiştir. Arayüzey, Ck45 çeliği üzerine krom kaplanması ile oluşturulmuştur. Kaplanmış Ck45 çeliği kalıp içerisine yerleştirilerek üzerine WC-%9Co besleme stoku enjekte edilmiştir. Enjeksiyon sürecinden sonra numunelere kimyasal bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemleri uygulanmıştır. Sinterleme aşamasında krom arayüzey difüzyon oranını azaltarak bileşenler arasında birleşmeyi engellediği için istenilen boşluk elde edilmiş ve montajlı parçanın hareketi sağlanmıştır. Bileşenler arasındaki boşluk toleransının kontrolü arayüzey kalınlığı ve sinterleme sıcaklığı parametreleri ile sağlanmıştır. Boşluk miktarının bu parametrelere olan etkisi matematiksel hesaplamalar ve sanal analizler ile incelenmiş, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. 1100, 1200 ve 1300°C sıcaklıklar ile sinterlenen montajlı parçalarda sırasıyla 50, 40 ve 30 µm boşluklar elde edilmiştir. Arayüzey kalınlığı ise parçadaki boşluk oluşumuna etki etmemiştir.

An investigation of manufacturing of assembled part by using chromium interface in powder injection molding process

H I G H L I G H T S

- Manufacturing of spherical joint without assembly
- The effects of chromium interface on diffusion mechanism
- Clearance control on assembled part manufactured by powder injection molding process

Article Info

Research Article

Received: 12.08.2017

Accepted: 21.03.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.416519

Keywords:

Powder injection molding,
chrome coating,
micro-clearance,
sintering,
assembled part

ABSTRACT

In this study, assembled parts with spherical shaped and movable interface production were investigated by powder injection molding method using a new method. In this method, the movement of the mechanism was provided by the coated chrome interface between the components. The interior and outer part of the mechanism was produced of Ck45 steel (insert) and WC-%9Co feedstock, respectively. The interface was formed with chrome plated onto Ck45 steel. The coated Ck45 steel was placed into mold and then WC-%9Co feedstock is injected onto insert. The chemical debinding and sintering processes were applied to specimens after injection. As a result of preventing to diffusion of chrome interface at the sintering stage, the desired clearance between the components was obtained and ensured the movement of assembled part. Control of the clearance between the components was provided by the interface thickness and sintering temperature parameters. The effect of the clearance on these parameters was investigated by mathematical calculations, virtual analyzes and these results were compared with the experimental results. For the sintering temperatures of 1100, 1200 and 1300°C the clearances were obtained as 50, 40 and 30 µm, respectively. It was observed that the thickness of the interface does not affect the clearance of ball joint.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: oгуzyilmaz2@gazi.edu.tr, kamran.samet@gazi.edu.tr, harunkocak@selcuk.edu.tr, cetink@gazi.edu.tr / Tel: +90 332 673 4089

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mafsal, hareket eden iki parçanın hareket edebilme özelliklerini kaybetmeden birbirine bağlanmasını sağlayan mekanik bir sistemdir. Küresel mafsal ise bir milin küresel bir yatak içinde belli açıyla hareket edebildiği mafsal türüdür [1]. Robot teknolojileri, savunma ve uzay sanayisi, otomotiv, medikal gibi birçok sektörde bu mafsallar yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu bağlantı elemanları, yüksek hız, rijitlik veya hassasiyetin gerekli olduğu robot mekanizmaları uygulamalarında kullanılır. Savunma ve uzay sanayisinde farklı geometrilerdeki kafes yapılarında, uçuş simülatörlerinde, havacılık endüstrisinde özel küresel rulman olarak kullanılmaktadır [2]. Otomotiv sektöründe kullanılan küresel mafsal bağlantıları, tekerleğin farklı durumlarında bağlantısının sürekliliğini sağlar ve kontrol kollarını direksiyon mafsallarına bağlar. Örneğin aracın ön tekerleği bir tümsekteyse, mafsal hareketli bir mekanizma olduğundan aksı hafif yukarı kaldırarak bağlı kalmasını sağlar [3]. Küresel mafsallar otomotiv sektörünün dışında sağlık sektöründe kalça ve parmak protezi olarak da kullanılabilir. Ayrıca vücuttaki eklemlerin büyük bir bölümünü oluşturan hareketli eklemler (sinovyal eklem) olarak kullanılırlar [4]. Küresel mafsalların bu alanlarda yaygın kullanımından dolayı daha pratik bir üretim metoduna ihtiyaç duyulmaktadır. Hareketli yüzeye sahip ve montajlı parça üretiminde fazladan kullanılan her imalat tekniği, zaman ve malzeme kaybına sebep olarak üretim maliyetini artırmaktadır. Ayrıca üretim sonrası işlemler ve parça imalat sürecinde toleransların denetlenmesi gerekir.

Yeni yapılan araştırmalar ile küçük ölçekteki mafsal imalatında malzeme ve geometrik sınırlamaları ortadan kaldırmak için toz enjeksiyon kalıplama (TEK) ve insörtlü toz enjeksiyon kalıplama (İTEK) yöntemi kullanılmaya başlanmıştır [5-7]. Plastik enjeksiyon kalıplama prensibine dayanan TEK yöntemi ile özellikle küçük boyutlu parçaların üretimi ve karmaşık şekilli parçalar daha düşük maliyette, daha yüksek üretim oranlarında imal edilebilmektedir. TEK yöntemi; besleme stokunun hazırlanması (toz-bağlayıcı karışımı), kalıba enjekte edilmesi, bağlayıcı giderme işlemi ve sinterleme olmak üzere dört temel adımdan meydana gelmektedir [8]. Bir TEK yöntemi olan insörtlü toz enjeksiyon kalıplama (İTEK) yönteminde ise, enjeksiyon esnasında kalıp boşluğu içine hazır insört konulmasına ve parçanın tümünün değil sadece insört çevresine besleme stokunun enjekte edilmesi prensibine dayanmaktadır. İTEK yönteminde, sinterleme işlemi sonucunda insört ile enjekte bölge arasında birleşme elde edilebilmesi için ara bölgede difüzyonun çok iyi olması gerekmektedir. Bu nedenle sinterleme işleminde difüzyon için gerekli olan sıcaklık, süre ve basınç parametreleri önemli olmaktadır [9-11]. Difüzyon, yer alan ve arayer difüzyon mekanizmaları olmak üzere iki farklı şekilde meydana gelebilmektedir. Yeralan difüzyonun gerçekleşebilmesi için Hume-Rothery kurallarının da sağlanması gerekmektedir [12]. Bu kurallar:

- Metal atomlarının yarıçapları farkı %15 den büyük olmamalıdır.
- Aynı kristal kafes yapısına sahip olmalıdır.
- Atomlar aynı valans elektron sayısına sahip olmalıdır.
- Metal atomları aynı elektronegativiteye sahip olmalıdır.

Arayer difüzyon mekanizması ise, küçük çaplı atomlar (hidrojen, bor, azot vb.) büyük çaplı atomların arasına difüzyon olması ile gerçekleşmektedir. Ayrıca kullanılan arayüzey cinsi de difüzyon kuvvetine etki edebilmektedir [13-15]

Son yapılan çalışmalarda TEK ve İTEK yöntemleri ile hareketli mafsalların da üretilebilirliği araştırılmıştır. Ruh ve arkadaşları [16] çalışmasında kendi geliştirdikleri besleme stoklarını kullanarak farklı malzemelerden yapılmış iki bileşenli parçaların birlikte sinterlenmesi sonucu mekanizma hareketinin gerçekleşmesini sağlamışlardır. Hareketi sağlayacak boşluk, malzemelerin sinterlemedeki hacimsel çekme farkından dolayı sağlanmıştır. Ancak bu yöntem, boşluk kontrolünün zor olması ve yöntemin seri üretime uygun olmaması nedeniyle pratik olmamıştır.

Bu yöntemin belirtilen konularda pratik olmaması, TEK işleminde kaybolabilen arayüzey ile ilgili çalışmaları beraberinde getirmiştir. Bu yeni yöntemde, parçada istenen boşluk enjeksiyon sonrasında kaybolabilen bir insört ile sağlanmaktadır. İnsört malzemesi için düşük erime noktası olan metaller, kalay-bismut alaşımı veya polimerler kullanılmaktadır. Proses üç temel adımdan meydana gelmektedir. İlk adımda insört kalıba yerleştirilir, daha sonra enjeksiyon işlemi yapılır. Son aşamada ise kalıptan çıkarılan parçada üzerindeki insört eritilir. Eritme işlemi sıcak banyoda veya indüksiyon işlemi ile gerçekleştirilmektedir. Bu proses ile montajlı parça üretimi, daha iyi yüzey kalitesi, daha hassas ölçü toleransları ve daha az işlem ile meydana gelmektedir [17-20]. Chartier vd. [21], Zhang ve arkadaşları [22], Williams vd. [23] çalışmalarında, bu yöntem ile bağlayıcı giderme aşamasında ortamdan uzaklaştırılabilen arayüzeyler üzerine araştırma yapmışlardır. Çalışmalar sonucunda arayüzeyler bağlayıcı giderme işlemlerinde ortamdan uzaklaştırarak parça üretimi gerçekleşmiştir. Ancak, bu yöntem seri üretimde uzun süre ve yüksek maliyetlidir. İnsörtün sürekli kullanılabilir olmaması ve her üretimde çekirdeğin tekrar oluşturulması da diğer bir dezavantajdır. Bunlara ek olarak bu yöntemde insörtün mukavemetinin düşük olması ve enjeksiyon esnasında deforme olabilmesi problem teşkil etmektedir.

Attia vd. [24], 316L paslanmaz çelik besleme stoku kullanarak TEK yöntemi ile parmak eklemi olarak kullanılabilen bir mafsalin üretilebilirliğini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, enjeksiyon işlemi ile oluşturulan polioksimetilen (POM) arayüzey kullanımı ile hareketli mafsal üretilebilmiştir. TEK yönteminde arayüzey kullanımının araştırıldığı bu çalışmalarda arayüzey oluşturabilmek için multi-enjeksiyon kalıbı ve bunun enjeksiyonu için de çift ekstrüderli enjeksiyon makinası

gerektirmektedir. Ayrıca, arayüzey, kimyasal bağlayıcı giderme işleminde giderildiğinde enjeksiyon bölgesinde çökme, bileşenler arası boşluğun homojen olmaması ve toz yığılması olabilmektedir. Bu olumsuzluklar, TEK yönteminde hareketli parça üretimi için kullanılan yöntemlerin geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu çalışmada bir TEK yöntemi olan insörlü toz enjeksiyon kalıplama (İTEK) yöntemi ile hareketli yüzeye sahip ve montajlı parçanın üretilebilirliği yeni bir yöntem kullanılarak araştırılmıştır. Hareketli mekanizmaların bileşenleri arasında ihtiyaç duyulan boşluğun krom arayüzey kullanımı ile oluşturulması amaçlanmıştır. Bu yöntemde arayüzey tabakası, multi-enjeksiyon yönteminin gerektirdiği kalıp ve multi-enjeksiyon tezgahı olmadan oluşturulmuştur. Krom kaplanmış insört üzerine enjeksiyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemleri gerçekleştirilerek hareketli parça üretilmiştir. Parçanın hareketi, bileşenler arası difüzyon oranını azaltan arayüzey ile sağlanmıştır. Sinterleme aşamasında herhangi bir kimyasal malzeme kullanılmadığı için kirlenme olmamış ve bileşenler arası boşluk kontrolü sağlanmıştır. Boşluk kontrolü farklı arayüzey kalınlıkları ve sinterleme sıcaklıkları kullanılarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda, hareketli arayüzeyli montajlı parça, TEK yöntemi sonrası başka bir imalat yöntemine gerek

duyulmadan 50, 40 ve 30 µm boşluk toleranslarında üretilmiştir.

2. MALZEME VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Malzeme (Material)

2.1.1. İnsört (Insert)

Bu çalışmada üretilen parça iki bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenlerden iç kısım (insört) Ck45 çeliğinden, dış kısım ise WC-%9Co besleme stokundan meydana gelmektedir. Ck45 çelik malzemeden talaşlı imalat yöntemiyle hazırlanmış insört Şekil 1a'da gösterilmiştir ve kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir. İnsörtler CNC tezgâhında sabit hız ve ilerlemede işlenmişlerdir. Daha sonra insörtlerin yüzey pürüzlülükleri ölçülüp aynı değerlerdeki insörtler deneyler için seçilmiştir. Şekil 1b'de ise küresel mafsal üretimine geçmeden önce ön deneylerde kullanılmak üzere Ck45 çeliğinden yapılmış insört gösterilmektedir.

2.1.2. Besleme stoku (Feedstock)

Deneyisel çalışmalarda WC-%9Co besleme stoku kullanılmıştır. Kullanılan besleme stokunun karakteristiği ve

Tablo 1. Ck 45 insörtün kimyasal bileşimi (Chemical composition of insert material of Ck 45)

Elementler	C	Si	P	S	Mn	Ni	Mo	Fe
Kütlece (%)	0,42-0,50	≤ 0,40	≤ 0,03	≤ 0,035	0,50-0,80	≤ 0,40	≤ 0,10	Kalan
Kristal kafes yapısı	Hekzagonal	Tetraedral	Triklinik	Ortorombik	Hacim Merkezli Kübik	Yüzey Merkezli Kübik	Hacim Merkezli Kübik	Hacim Merkezli Kübik
Valans elektron sayısı	4	4	5	6	4	2	6	3

Tablo 2. WC-%9Co besleme stokunun karakteristiği (The characteristic of WC-%9Co feedstock)

Besleme stoku türü	Tedarikçi	Üretim şekli	Toz şekli	Toz boyutu (µm)		
				D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀
WC-%9Co	RYER	Atomizasyon	Karmaşık şekilli	0,15	0,28	0,52

Tablo 3. WC-%9Co besleme stokunun kimyasal bileşimi (Chemical composition of WC-%9Co feedstock)

Elementler	C	Cr	Fe	Mo	Ni	W	Co	O
Kütlece (%)	5,54	0,01	0,01	0,01	0,01	85,43	8,94	0,05
Kristal kafes yapısı	Hekzagonal	Hacim Merkezli Kübik	Hacim Merkezli Kübik	Hacim Merkezli Kübik	Yüzey Merkezli Kübik	Hacim Merkezli Kübik	Hekzagonal	Monoklinik
Valans elektron sayısı	4	6	3	6	2	6	4	2

kimyasal bileşimi Tablo 2 ve Tablo 3'te, taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü ise Şekil 2'de görülmektedir.

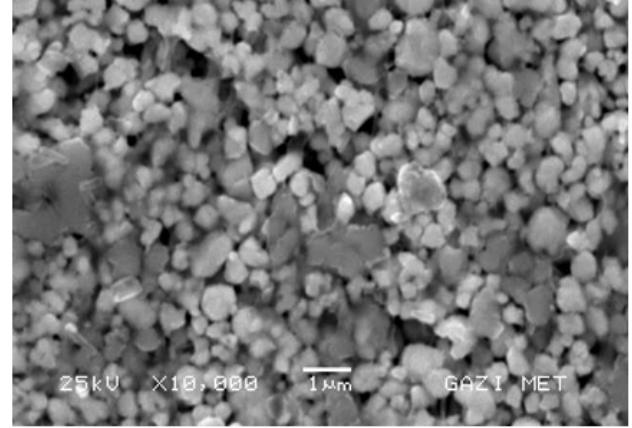


Şekil 1. a) Küresel başlıklı insört parça b) Ön deneyler için hazırlanmış insört parça
(a) insert with spherical end b) insert for preliminary experiments)

2.1.3. Arayüzey (Interface)

Bileşenler arası arayüzey kullanılmadığında, besleme stoku ve insört difüzyonu meydana gelmektedir ve montajlı parça hareketi oluşmamaktadır. Bu sebeple arayüzey kullanımına ihtiyaç duyulmuştur ve arayüzey olarak krom kullanılmıştır. Krom arayüzey, sinterleme aşamasında difüzyon oranını azaltan bir tabaka olarak işlev görmektedir ve böylece arada birleşme olması engellenmektedir. Mafsal hareketi de bu sayede gerçekleşmektedir. Kromun sinterleme aşamasında difüzyon oranını azaltacak arayüzey olması sebebiyle difüzyonu etkileyecek özellikleri önemlidir. Bu özellikler Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 5'te ise krom elementi ile

besleme stoku ve insört malzemelerindeki elementlerin atom çapları verilmiş ve karşılaştırılmıştır.



Şekil 2. WC-%9Co besleme stoku SEM görüntüsü
(SEM image of WC-%9Co feedstock)

2.2. Metot (Method)

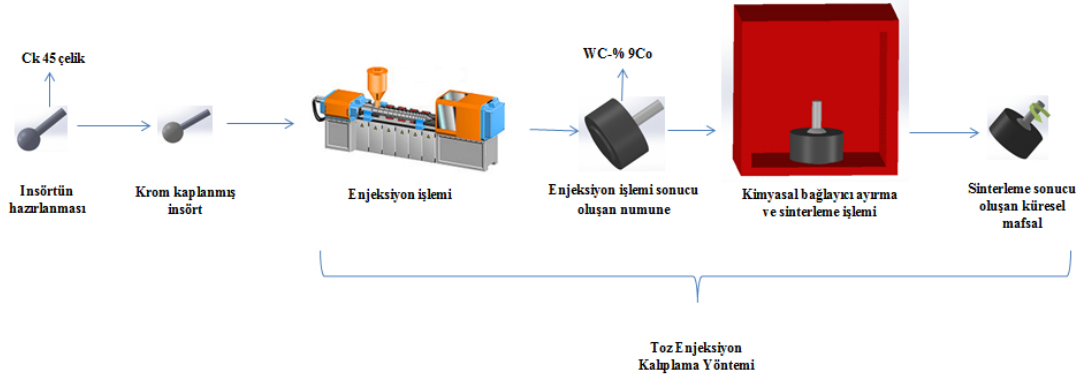
Çalışmada, küresel şekilli montajlı parçaların üretim yöntemi Şekil 3'te görüldüğü üzere temel olarak üç aşamadan meydana gelmektedir. İlk aşamada insört hazırlanmıştır, ikinci aşamada krom kaplanarak arayüzey oluşturulmuştur ve üçüncü aşamada TEK yönteminin adımları uygulanmıştır.

Tablo 4. Kromun difüzyon karakteristiği (Diffusion characteristics of chromium) [25-27]

Erime sıcaklığı (°C)	Tungsten atomları içerisinde		Demir atomları içerisinde		Kobalt atomları içerisinde		Atom yarıçapı (nm)	Kristal kafes yapısı	Valans elektron sayısı
	Aktivasyon enerjisi (kJ/mol)	Difüzyon katsayısı (cm ² /s)	Aktivasyon enerjisi (kJ/mol)	Difüzyon katsayısı (cm ² /s)	Aktivasyon enerjisi (kJ/mol)	Difüzyon katsayısı (cm ² /s)			
1907	547	10 ⁻¹⁰	291,8	10,8	70	7,3x10 ⁻³	0,166	Hacim Merkezli 6 Kübik	

Tablo 5. Krom ile diğer elementlerin atom çaplarının karşılaştırılması [28]
(Comparison of atomic diameter chromium and other elements)

Element	Cr	C	Si	P	S	Mn	Ni	Mo	Fe	Co	W	O
Atom çapı (nm)	0,332	0,268	0,222	0,196	0,176	0,322	0,298	0,38	0,312	0,304	0,386	0,096
Atom çapı farkı (%)	-	-59,63	-33,13	-40,96	-46,98	-3,01	-10,24	14,45	-6,02	-8,43	16,26	-71,08



Şekil 3. Küresel mafsalsın üretim metodu (Production method of ball joint)

2.2.1. Kaplama işlemi (Coating process)

Şekil 1’de gösterilen insörtler hazırlanmış ve Ceka Sert Krom Kaplama Ltd. Şti. firmasında yağ ve pas alma gibi temizleme işlemleri yapıldıktan sonra krom kaplanarak Cr arayüzey oluşturulmuştur. Kaplama işlemi, elektroliz yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Kaplama işleminde insörtlerin yüzey alanları hesaplanarak 15-25 A/dm² değerine göre akım ayarlanmıştır. Çözünmeyen kurşun anot kullanılarak kaplama banyosu 50-60°C arasında tutulmuş ve istenilen kalınlık için gerekli süre kadar beklenmiştir. İşlem sonrası kaplama kalınlığı X-ray ölçme cihazıyla ölçülerek kontrol edilmiştir.

2.2.2. Enjeksiyon işlemi (Injection process)

Sonraki aşamada, TEK işlemleri uygulanmıştır. Arayüzeye sahip insört Şekil 4’te gösterilen kalıp içerisine yerleştirilerek üzerine WC-%9Co besleme stokunun enjeksiyonu gerçekleştirilmiştir. İç kısmında 6 mm insört bulunan numunelerin çapı 20 mm kalınlığı 3 mm’dir. Numuneler Arburg Allrounder 220 S/ 250-60 enjeksiyon makinesinde kalıplanmıştır. Enjeksiyon sonrası ortaya çıkan parça Şekil 5’te gösterilmektedir.

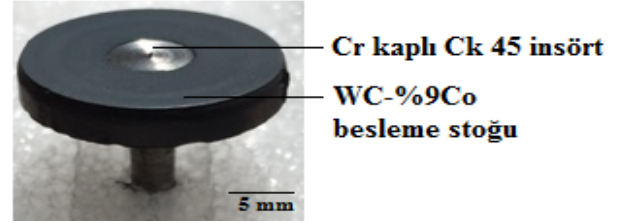


Şekil 4. Enjeksiyon işlemi için kullanılan kalıp (The mold used for injection process)

2.2.3. Bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemleri (Debinding and sintering process)

Enjeksiyon işleminin ardından numunelere bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemleri uygulanmıştır. Bağlayıcı

giderme işlemi iki adımda gerçekleştirilmiştir. Birinci adımda numuneler 60°C sıcaklıktaki etanol çözeltisinde 48 saat bekletilerek kimyasal bağlayıcı giderme işlemi gerçekleştirilmiştir. İkinci adımda termal bağlayıcı giderme işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. Enjeksiyon işlemi sonrası üretilen rijit parça (Injected rigid part produced after injection process)

2.3. Deney Tasarımı ve Yöntem için Analizler (Experimental Design and Analysis for Method)

2.3.1. Deney tasarımı (Experimental Design)

TEK yöntemi ile hareketli, montajlı parça üretimi için deney tasarımı yapılmıştır. Besleme stoku WC-%9 Co ve insört malzemesinin Ck45 olmasından dolayı sinterleme sıcaklıkları besleme stokunun sinterleneceği, insörtün erimeyeceği sıcaklıklar seçilmiştir. Ayrıca kaplama kalınlığının etkisini görmek içinde farklı kalınlıklarda kaplama yapılmıştır. Deneyler Tablo 5’te verilen deney tasarımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sayede sinterleme sıcaklığı ve arayüzey kalınlığının parçadaki boşluk oluşumuna etkisi incelenmiştir.

2.3.2. Analizler (Analysis)

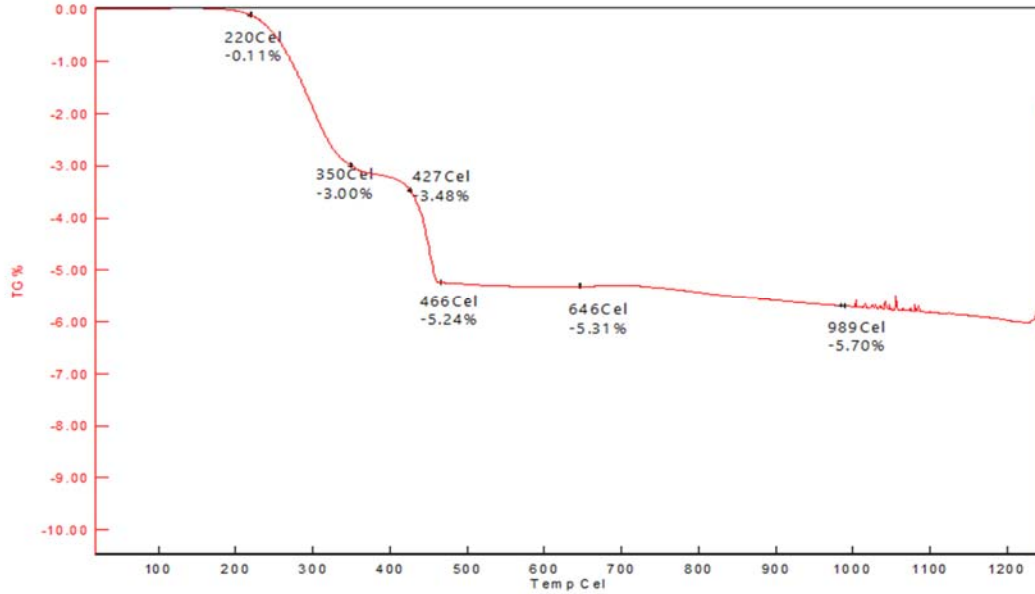
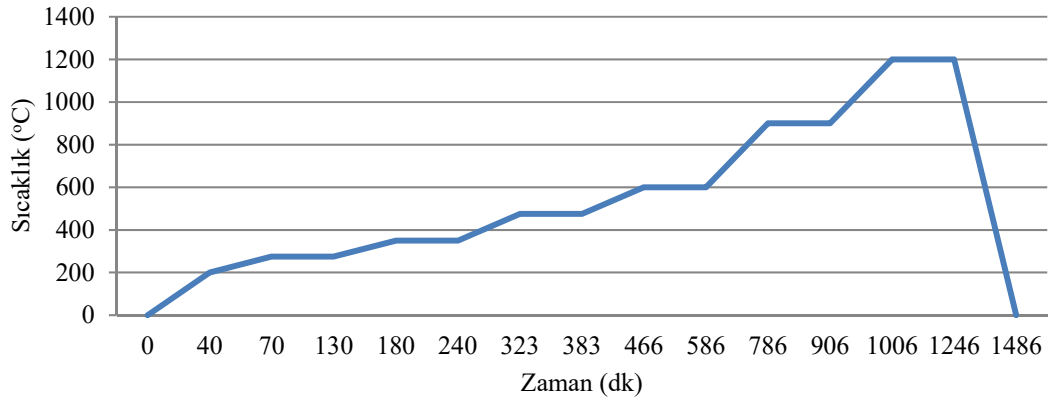
Bağlayıcı giderme ve sinterleme işlemlerinde belirlenen parametreler, bağlayıcı sistemleri üzerine yapılan termogravimetrik (TG) analizler dikkate alınarak belirlenmiştir. Şekil 6’da WC-%9Co besleme stokunun TG analizi gösterilmektedir. TG analizine göre besleme stokunda bağlayıcıların önemli bir kısmı 175-475°C sıcaklıklarda numuneden ayrılmaktadır. 475°C sıcaklıktan sonra sinterleme sıcaklığına kadar önemli bir kayıp olmamıştır.

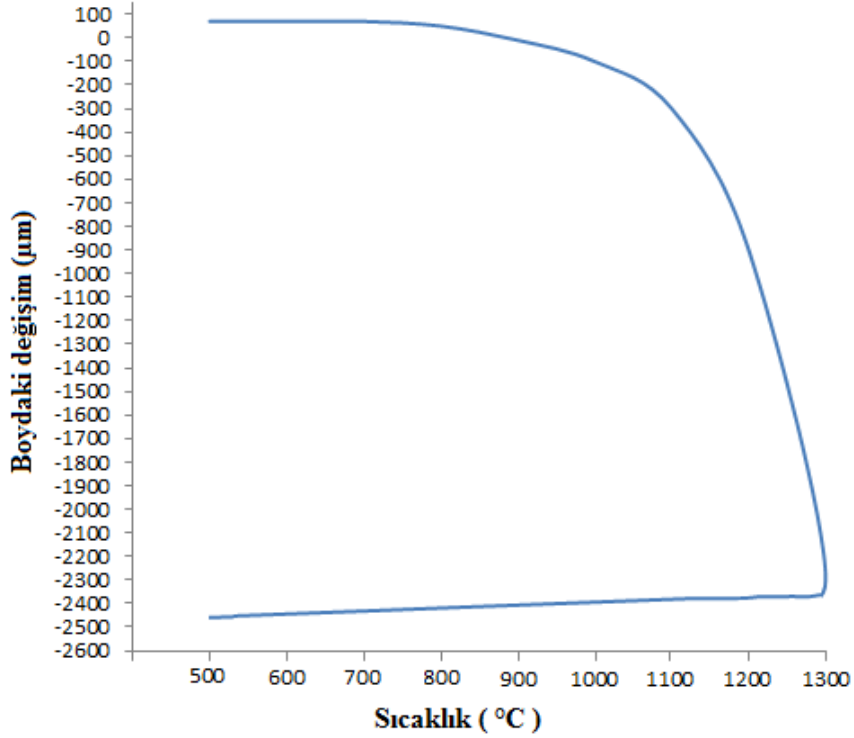
Tablo 5. Deneysel tasarım (Experimental Design)

Sinterleme sıcaklığı (°C)	Kaplama kalınlığı (µm)
1100	20
	50
	100
	150
1200	20
	50
	100
	150
1300	20
	50
	100
	150
1400	20
	50
	100
	150

Numuneler kontrol atmosferli (%95 N₂ ve %5 H₂) MTI KSL-1600X sinterleme fırınında sinterlenmiştir. Sinterleme işleminde numunelerin oda sıcaklığına kadar soğutulması 5°C/dak ile aynı ivmede gerçekleştirilmiştir. TG analizi sonucuna göre 1200°C sıcaklıkta, besleme stoku için hazırlanan sinterleme aşamasının sıcaklık-zaman döngüsü Şekil 7’de verilmiştir.

Deneyel çalışmaların sonucunda boşluk oluşum mekanizmasını tanımlamak ve teorik çalışmalar ile deneysel çalışmaları karşılaştırmak amacıyla besleme stokunun dilatometre analizi yapılmıştır (Şekil 8). Böylece besleme stokunu termal genişleme katsayısı ve sinterleme aşamasındaki hacimsel çekme davranışı elde edilmiştir. Deneysel sonuçta 1300°C sıcaklıktaki sinterleme için toplam hacimsel çekme oranı %16 olarak hesaplanmıştır. Sinterleme sonrası numunelerin ara bölgelerinde oluşan boşluk optik mikroskop yardımıyla ölçülmüş ve yapılan teorik hesaplamalarla karşılaştırılmıştır.

**Şekil 6.** WC-%9Co besleme stokunun termogravimetrik analizi (Thermogravimetric analysis of WC-%9Co feedstock)**Şekil 7.** WC-%9Co besleme stokunun 1200°C sinterleme için sıcaklık-zaman döngüsü (The temperature-time cycle of WC-%9Co for 1200°C sintering process)

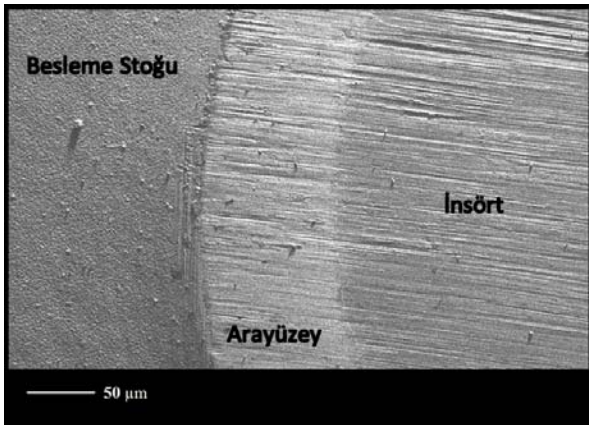


Şekil 8. WC-%9Co besleme stokunun dilatometre analizi (Dilatometer analysis for feedstock of WC-%9Co)

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

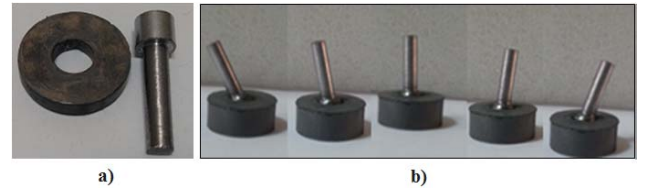
3.1. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Enjeksiyon sonrası rijit yapının SEM cihazı kullanılarak elde edilen kesit görüntüsü Şekil 9'da verilmektedir. Şekilde kalınlığı yaklaşık 100 µm olan krom tabakasının, WC-%9Co besleme stoku ile Ck45 insört arasında simetrik olarak dağıldığı görülmektedir.



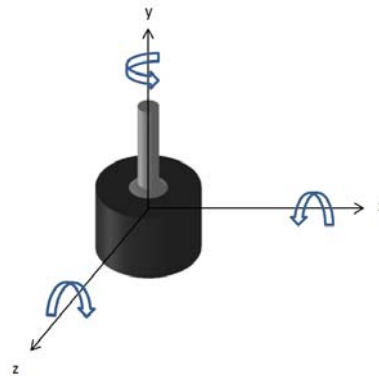
Şekil 9. Enjeksiyon sonrası parçanın kesit görüntüsü
(Cross sectional view of injected part)

Şekil 7'deki sıcaklık-zaman döngüsüne göre sinterlenmiş parçalar sinterleme işlemi sonrası Şekil 10'da gösterildiği gibi hareketli hale gelmiştir.



Şekil 10. Sinterleme sonrası numunelerin görüntüsü (a: ön deney numunesi b: küresel mafsallı numuneler)
(Image of samples after sintering (a: preliminary test sample, b: spherical joint))

Şekil 11'de sinterleme sonucu elde edilen mafsalın, hareket eksenleri gösterilmiştir. Mafsal x, y ve z eksenlerinde dönme hareketi yapabilmektedir. Enjeksiyon sonrası hareketsiz bir yapıya sahip olan parça, sinterleme sonucunda 3 serbestlik derecesi kazanmıştır.



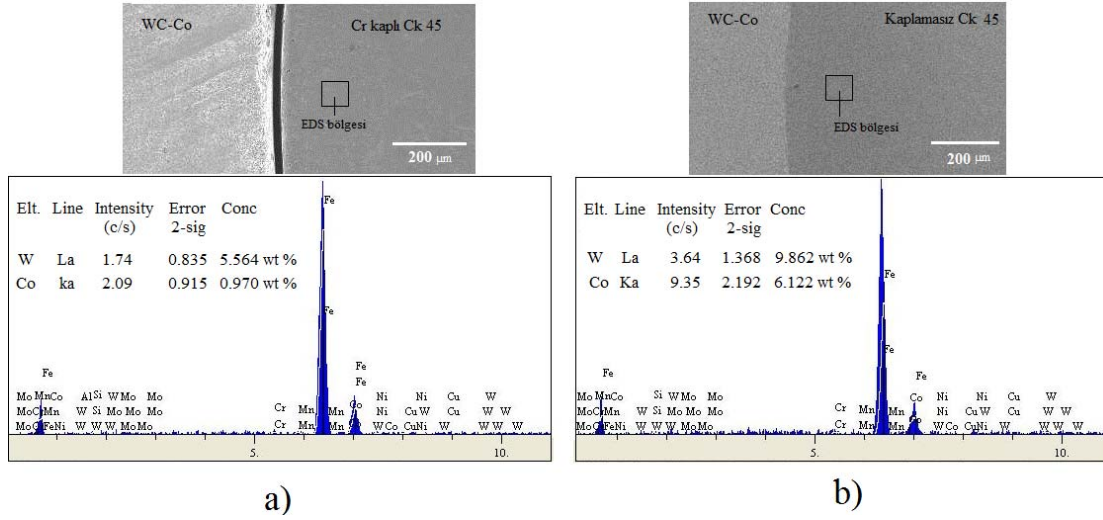
Şekil 11. Küresel mafsalın dönme eksenleri
(The rotational axes of ball joint)

Tablo 4 ve Tablo 5'te özellikleri belirtilen krom arayüzey, kullanılan diğer elementlere göre sinterleme aşamasındaki yüksek aktivasyon enerjisi (547 kJ/mol), büyük atom çapı (0,332 nm), yüksek difüzyon katsayısı (10^{-10} cm²/s) ve yüksek erime sıcaklığı (1907°C) özellikleri sebebiyle WC-%9Co malzeme ile Ck45 çelik arasında difüzyon azalmaktadır. Krom kaplı Ck 45 insörtün dış çapından 200 µm içeride sinterleme sonrası yapılan EDS analizinde ağırlıkça W %5,564 Co %0,970 bulunurken kaplamasız Ck 45 insörtün aynı bölgesinde W %9,862 Co %6,122 bulunmuştur (Şekil 12). Bu sonuçtan krom arayüzeyin WC-Co tarafından çelik tarafına doğru difüzyonu önemli ölçüde azalttığı anlaşılmıştır. Bu sayede bileşenler arası boşluk oluşmuştur ve küresel mafsallık hareketi elde edilmiştir. Sinterleme esnasında besleme stoku içerisindeki bağlayıcıların sıcaklıkla beraber ortamdan giderilmesi ve sıvı sinterleme ile parçada bir miktar hacimce küçülme meydana gelmektedir. WC-%9Co besleme stokunun dilatometre analizi yapılarak sıcaklığa bağlı boyutsal değişimi belirlenmiştir. Şekil 8'de belirtilen dilatometre analizine göre besleme stokunun 800°C sıcaklığa kadar genişlediği ve bu sıcaklıktan sonra sürekli hacimsel küçülme meydana geldiği görülmektedir. Besleme stokunun sinterleme aşamasında krom arayüzeye difüzyonu

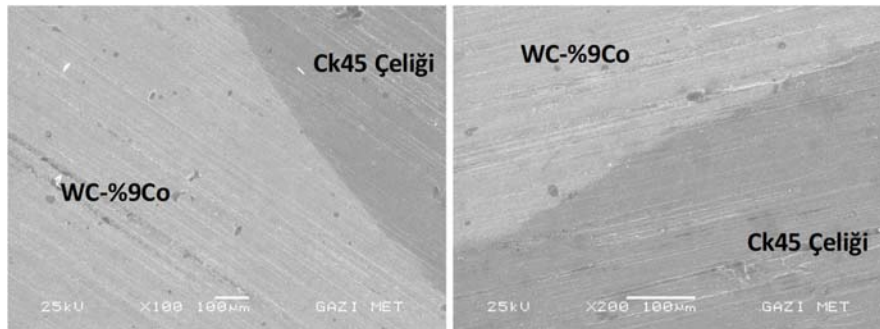
gerçekleşmediği için arayüzey ve insörtten bağımsız olarak hacimsel çekmeye maruz kalmıştır. İTEK yöntemi ile parça üretimi, bu hacimsel çekmeden faydalanılarak gerçekleştirilmektedir. Hacimsel çekme, insört üzerinde basınç oluşturularak difüzyonun sağlanmasına etki eder. Ancak bu çalışmada ara bölgede boşluk elde edebilmek için krom arayüzey kullanılarak difüzyon oranını azaltılmaya çalışılmıştır. Şekil 13'te krom arayüzey kullanılmadan üretilen parçaların SEM görüntüsü verilmiştir. Malzemelerin birleşme bölgelerinde boşluksuz bir yapı olduğu mikroskop görüntülerinde görülmektedir.

Dilatometre analizinden elde edilen verilere göre Şekil 14'te, WC-%9Co besleme stoku ve Ck45 çeliğinin hacimsel davranışları genleşme katsayıları kullanılarak elde edilmiştir. Buna göre;

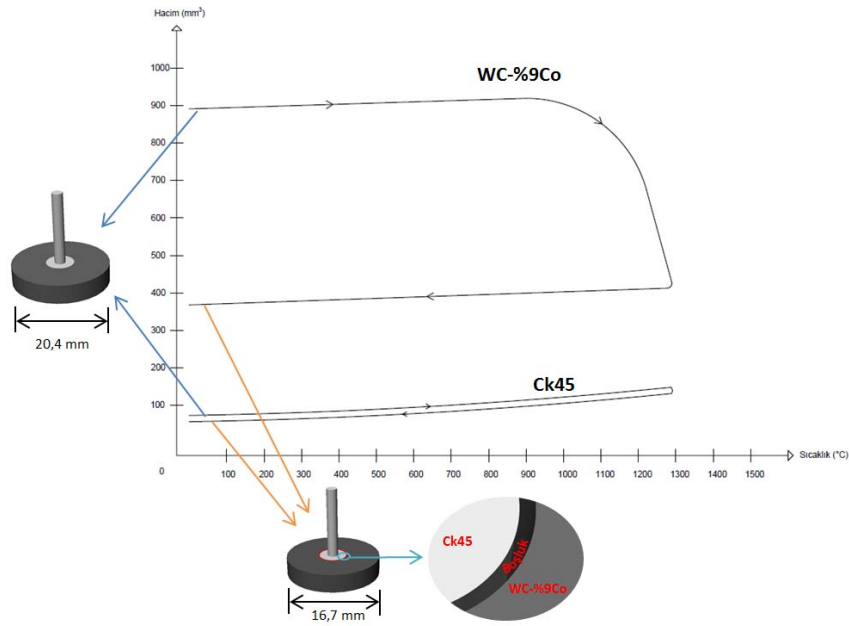
- 980°C sıcaklığa kadar; besleme stoku ve insört hacimsel olarak genişlemektedir. İnsörtün besleme stokundan daha fazla genişmesi bu aşamada bileşenler arasında bir gerilme meydana getirmektedir. Ancak bu gerilme, atomik geçişler olamadığından difüzyonu sağlamamıştır. Bu aşamada besleme stoku ve insört arasında boşluk olmamaktadır.



Şekil 12. 1300°C Sinterleme sonrası yapılan EDS analizi (a) Cr kaplı Ck 45 insört, b) kaplamasız Ck 45 insört)
(EDS analys after sintering at 1300°C (a) Cr coated Ck 45 insert, b) uncoated Ck 45 insert)

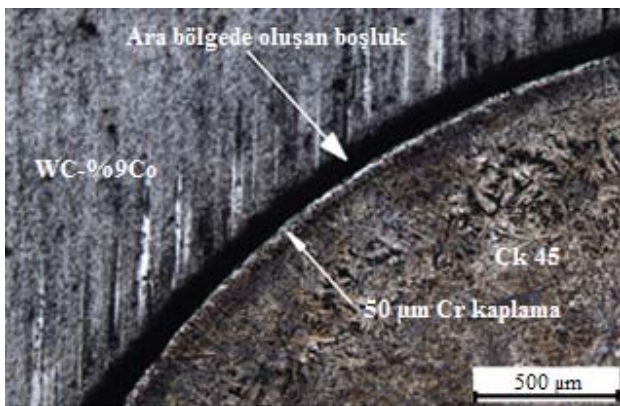


Şekil 13. WC-%9Co ve Ck45 çeliğinin birleşme bölgesinin SEM görüntüsü
(SEM images of diffused zone for WC-%9Co feedstock and Ck45 materials)



Şekil 14. Malzemelerin hacimsel davranışı sonucu oluşan boşluğun şematik anlatımı
(The schematic description of the clearance resulting from the differences of volumetric behaviour)

- 980°C'den sinterleme sıcaklığına kadar; besleme stokundaki bağlayıcıların ayrışması sonucu hacimsel çekme meydana gelirken insörtün hacimsel genişmesi devam etmektedir. Bundan dolayı boşluk oluşmamaktadır.
- Sinterleme sıcaklığından oda sıcaklığına kadar; sinterleme sonrası soğuma aşamasında besleme stoku ve insörtün hacimsel çekme davranışından dolayı boşluk oluşumu meydana gelmektedir. Böylece, insörtün enjeksiyon içerisinde hareket edebileceği tolerans meydana gelmektedir. Şekil 15'te sinterlenmiş bir parçada meydana gelen bu boşluğun optik mikroskoptaki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 15. 1100°C'de sinterleme sonrası parçadaki boşluğun optik mikroskoptaki görüntüsü
(The optical image of the clearance after sintering at 1100°C)

Sinterleme sıcaklığı ve arayüzey kalınlığı bileşenler arasındaki boşluk miktarına etkisi Tablo 6'da

gösterilmektedir. Tablo 6'dan görüleceği üzere bileşenler arasındaki boşluk miktarı, arayüzey kalınlığı ile değişmemiştir. Sinterleme sıcaklığı arttığında besleme stokundaki çekme miktarı arttığından dolayı boşluk miktarı azalmıştır. En düşük sıcaklık (1100°C) ile sinterlenen parçalarda en fazla boşluk miktarı (50 µm) elde edilirken en yüksek sıcaklıkta (1300°C) sinterlenmiş parçalarda en az boşluk miktarı (30 µm) elde edilmiştir. 1400°C'de Ck45 çeliğinin erimesi sebebiyle sonuç alınamamıştır (Şekil 16).



Şekil 16. 1400°C sıcaklıkta sinterlenmiş numune
(Sintered part at 1400°C)

Krom arayüzeyin malzeme ve difüzyon karakteri, farklı arayüzey kalınlıklarında aynı boşluk miktarı oluşturmuştur. Arayüzey kromun erime sıcaklığı yüksek olduğundan (1907°C) sinterleme sırasında ortamdaki giderilmemiştir. Ayrıca arayüzeyin sinterlemede diğer bileşene difüzyon olmaması sebebiyle atomik geçişler olmamaktadır. Böylece sinterleme sonrasında farklı arayüzey kalınlıklarına sahip olan parçalar, her arayüzey kalınlığında benzer hacimsel çekme farkı oluşmuştur. Arayüzey, yalnızca difüzyon oranını azaltmak için kullanılmıştır. Bundan dolayı parçada farklı krom kalınlıkları için aynı boşluk miktarı oluşmuştur. Ancak sinterleme aşamasında arayüzeyin ortamdaki

giderilmesi veya arayüzey ile bileşenler arası atomik geçişlerin olması (difüzyon), arayüzey kalınlığını etkin bir parametre yapacaktır.

Tablo 6. Sinterleme sıcaklığı ve arayüzey kalınlığının boşluk miktarına etkisi
(The effects of sintering temperatures and thickness of interface on generating the clearance)

Sinterleme sıcaklığı (°C)	Kaplama kalınlığı (µm)	Boşluk miktarı (µm)
1100	20	50
	50	50
	100	50
	150	50
1200	20	40
	50	40
	100	40
	150	40
1300	20	30
	50	30
	100	30
	150	30
1400	20	Sonuç alınamamıştır.
	50	
	100	
	150	

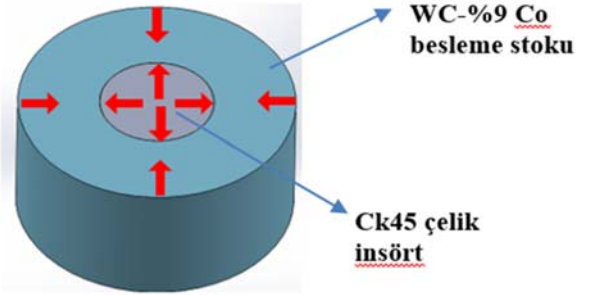
Atomik geçişlerin yani difüzyonun olmaması Hume-Rothery kurallarının gerçekleşmemesinden kaynaklanmaktadır. Tablo 7’de arayüzey elementi ile kullanılan diğer elementlerin atom çapları karşılaştırılmıştır. Atom çapları arasındaki farkın %15’ten fazla olduğu görülmektedir. Arayüzey elementinin Tablo 4’te verilen özellikleri (atom çapı, kristal kafes yapısı valans elektron sayısı) Tablo 1 ve Tablo 3’te verilen diğer elementlerin özellikleri ile karşılaştırıldığında Hume-Rothery kurallarına göre difüzyon için yeterli koşulların sağlamadığı görülmektedir. Arayüzeyin, yüksek aktivasyon enerjisi (547 kJ/mol) ve yüksek difüzyon katsayısının (10^{-10} cm²/s) olması da difüzyon oranını azaltan bir etki oluşturmaktadır. Arayüzey difüzyon mekanizması için gerekli olan elementler ise bulunmamaktadır. Ayrıca, arayüzeyin aktivasyon enerjisinin fazla olması, difüzyon olması için yüksek sıcaklık ve süre gerektirmektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda kromun tungstene difüzyonu için gerekli olan sıcaklık değerinin ortalama 1400°C olurken sinterleme süresinin ise 22 saat olması gerektiği belirtilmiştir [29, 30].

Bu çalışmada kullanılan sinterleme parametreleri bileşenlerin birbirleri arasındaki difüzyonu gerçekleştirmek için yeterli olmamıştır. Difüzyonun gerçekleşmediği bu malzeme kombinasyonu boşluğun oluşumunda etkili rol oynamıştır. Difüzyonun gerçekleşmemesine ek olarak besleme stokunun sinterleme esnasında hacimsel çekmesi bileşenler arasında mikron seviyesinde boşluk

oluşturmuştur. Bu sayede sinterleme sonucunda küresel mafsallarda elde edilmiştir.

3.2. Teorik Sonuçlar (Theoretical Results)

Montajlı parçanın yeni üretim yöntemi prensibinin ifade edilmesi amacıyla matematiksel hesaplamalar ve sanal analizler gerçekleştirilmiştir. Bulunan sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Montajlı parça üretiminde bileşenler arası boşluk oluşumu sinterleme sıcaklığı ile değişmektedir. Deneysel sonuçlarda da bahsedildiği gibi besleme stokunun hacimsel çekme miktarı bu boşluğa etki eden parametrelerden biridir. Sinterleme sıcaklığının düşük olması dilatometre analizinde de görüleceği üzere (Şekil 8) besleme stokunun bu aşamada hacimsel çekme miktarını azaltmaktadır. Daha düşük sıcaklıkta sinterlenen besleme stoku, soğuma aşamasına daha büyük bir hacim ile başlamaktadır. Bunun sonucunda düşük sıcaklıkta daha fazla hacimsel çekme meydana gelmektedir. Besleme stokunun hacimsel çekme yönü Şekil 17’de modellenmiştir.



Şekil 17. Besleme stokunun hacimsel çekme doğrultuları
(Volumetric shrinkage direction of the feedstock)

Bu çekme sonucunda oluşan boşluk soğuma aşamasında gerçekleşmektedir. WC-%9Co farklı sıcaklıklarda sinterlendiğinde farklı çekme davranışına sahip olacağından hesaplamalarda daha doğru sonuca ulaşabilmek için hacimsel genişmeden yola çıkılmıştır. Dilatometre analizinden WC-%9Co malzemenin 1100°C, 1200°C ve 1300°C’deki hacmi (V_0) ve termal genişleme katsayıları (α) elde edilmiştir. Ck45 çeliğinin termal genişleme katsayısı (α) ise tedarik edilen firmadan alınmış ve Eş. 1’den hacmi (V_0) hesaplanmıştır. Eş. 2 kullanılarak bu verilerden WC-%9Co ve Ck 45 malzemelerin soğuma esnasındaki ΔV miktarları elde edilmiştir. Her bir sıcaklıktaki WC-%9Co ve Ck 45 çelik arasındaki ΔV farkları alınarak aradaki boşluğun hacmi bulunmuştur. Bulunan boşluk hacmi ve Eş. 3 kullanılarak aradaki boşluğun ölçüsü hesaplanmıştır. Hesaplanan boşluk değerlerine göre sinterleme sıcaklığı azaldıkça iki malzeme arasında hacimsel çekme farkının arttığı tespit edilmiştir. Her bir sinterleme sıcaklığı için hacimsel çekme farkı sonucu oluşan bileşenler arası boşluk hacimleri ve miktarları Tablo 7’de gösterilmiştir.

$$V_0 = \left(\frac{\pi}{4}\right) d^2 \cdot T \quad (1)$$

$$\Delta V = V_0 \cdot 3\alpha \cdot \Delta T \quad (2)$$

$$V_b = \frac{\pi}{4} (d_d^2 - d_i^2) \cdot T \quad (3)$$

- ΔV : Hacimsel küçülme (mm^3)
 ΔT : Sıcaklık farkı ($^{\circ}\text{C}$)
 V_b : oluşan boşluğun hacmi (mm^3)
 t : kalınlık (mm)
 d : insört çapı (mm)
 V_0 : Sinterleme sıcaklıklarındaki hacimler (mm^3)
 d_d : Oluşan boşluğun dış çapı (mm)
 d_i : Oluşan boşluğun iç çapı (mm)

Matematiksel hesaplamalar sonucunda sinterleme sıcaklığı arttıkça boşluk miktarının azaldığı görülmektedir. Deneysel ve matematiksel olarak gözlemlenen bu sonucu desteklemek için sonlu elemanlar analizi ANSYS yazılımı ile yapılmıştır. Tablo 9’da verilen termal genişleme katsayısı değerleri ve Tablo 8’de verilen malzeme özellikleri programa girilmiştir.

Sinterleme sıcaklığından sonra analiz yapılacağı için WC-%9Co malzemesinin özellikleri alınmıştır.

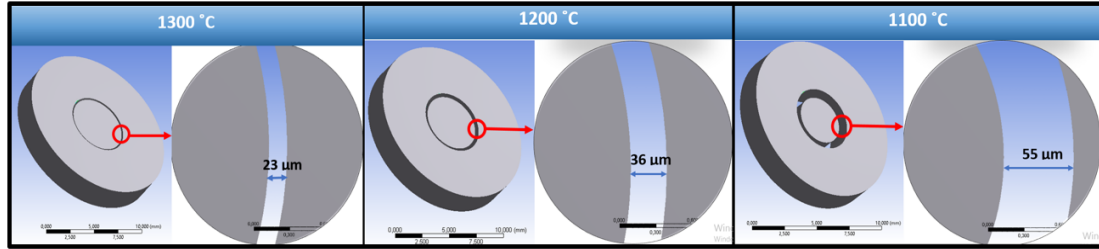
Tablo 8. Malzeme özellikleri (Material properties)

	Young Modülü (GPa)	Poisson Oranı (mm/mm)	Yoğunluk (g/cm^3)	Referans
Ck45 çeliği	200	0,29	7,87	[31]
WC	700	0,31	15,63	[32]

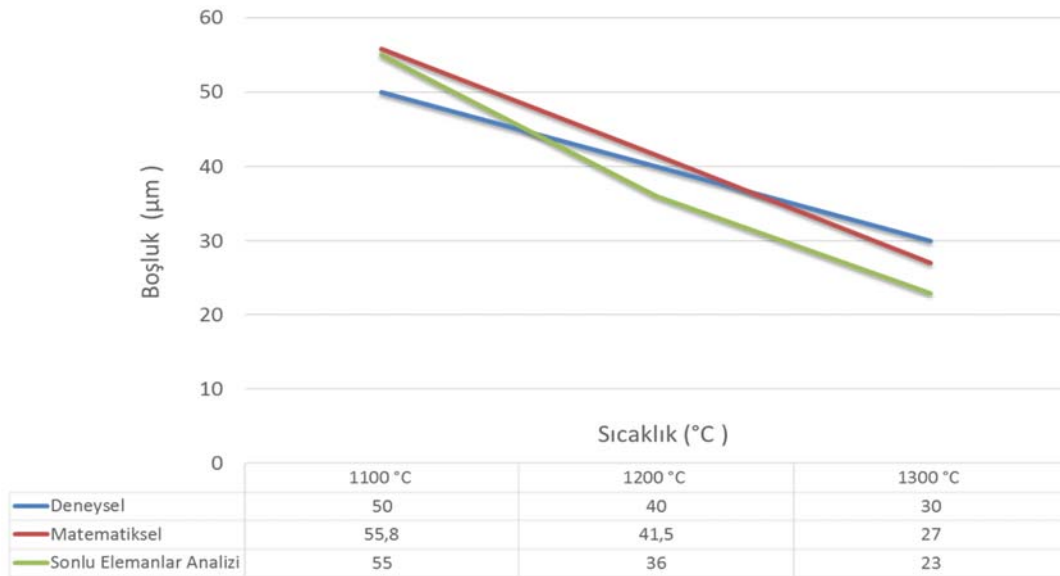
Malzeme özellikleri programa girildikten sonra mesh yapısı oluşturulmuş ve termal koşullar eklenmiştir. Yapılan analizler sonucunda parçanın soğuma aşamasında düşük sıcaklıkta hacimsel çekme farkından dolayı daha fazla boşluk meydana gelmiştir (Şekil 18). Boşluk miktarı programda bulunan ölçek ile hesaplanmıştır. 1100, 1200 ve

Tablo 7. Farklı sıcaklıklarda bileşenler arası oluşan boşluk miktarları (Generated clearance at different temperatures)

Sıcaklık	Bileşenler arası hacimsel çekme farkı sonucu oluşan boşluk miktarları		
	Hesaplanan boşluk hacmi	Matematiksel olarak bulunan boşluk ölçüsü	Deneysel sonuçlar
1300 $^{\circ}\text{C}$	2,82 mm^3	27 μm	30 μm
1200 $^{\circ}\text{C}$	9,09 mm^3	41,5 μm	40 μm
1100 $^{\circ}\text{C}$	12,39 mm^3	55,8 μm	50 μm



Şekil 18. Sinterleme sıcaklığının boşluk oluşumuna etkisinin sonlu elemanlar analizi (Finite Element analysis of the effects of sintering temperature)



Şekil 19. Deneysel ve teorik sonuçların karşılaştırılması (Comparison of the theoretical and experimental results)

1300°C’de hesaplanan boşluk miktarları sırası ile 55, 36, 23 µm olmuştur. Elde edilen deneysel, matematiksel ve analiz sonuçları Şekil 19’da karşılaştırılmıştır. Boşluk oluşumu deneysel ve teorik sonuçlar birbirleri ile paralellik göstermektedir.

Bu çalışma ile montajlı parça imalatı yalnızca TEK yöntemi kullanarak gerçekleştirilmiştir. Bu yeni yöntem ile montajlı parça üretimi, diğer çalışmalara göre daha pratik ve ekonomik üretilmiştir. Örneğin; Attia ve arkadaşları [24], montajlı parça üretimini multi-enjeksiyon ile gerçekleştirmiştir. Parça üretimi için multi-enjeksiyon kalıbı ve bunun enjeksiyonu için de çift ekstrüderli enjeksiyon makinası gerekmektedir. Böylece üretim süresi ve maliyeti çalışmamıza göre daha fazla olmaktadır. Ayrıca, önceki çalışmalarda [7, 21, 24, 33] montajlı parça üretimi için iki bileşen arasında oluşturulan termoplastik arayüzey, katalitik ve kimyasal bağlayıcı giderme esnasında ortamdaki uzaklaştırılmıştır. Boşluk kontrolü ise arayüze enjekte edilen termoplastik malzeme kalınlığı ile sağlanmaktadır. İstenilen kalınlıkta arayüzey enjekte etmek kolay olamamakla dolayısıyla arzu edilen boşluk elde etmek zor olmaktadır. Ayrıca, arayüzeyin bağlayıcı giderme işlemi ortamdaki uzaklaşması, sinterlemedeki yerleştirme şekline bağlı olarak parçadaki boşluğun homojen dağılmamasına sebep olmaktadır. Bu çalışmada ilk kez malzeme, difüzyon ve sinterleme mekanizmalarının avantajları kullanılarak parçada arzu edilen boşluk ve homojen boşluk dağılımı elde edilmiştir.

Literatürdeki bir diğer montajlı parça üretim yöntemi olan kaybolabilen arayüzey çalışmalarında enjeksiyon sonrası bağlayıcı giderme öncesi eriyebilen insört kullanılarak parça üretimi gerçekleştirilmiştir [20, 34 - 37]. Bu çalışmalarda da arzu edilen boşluk ve homojen boşluk dağılımı elde edilememiştir. Çalışmamızda ise parça üretimi arayüzey ortamdaki giderilmeden yapılmıştır. Bunun sonucunda enjeksiyon bölgesindeki çökme, toz yığılması ve parçadaki kirlilik oluşumu engellenmiştir. Ruh ve arkadaşları [16] montajlı parça üretiminde boşluğu sinterlemedeki hacimsel çekme farkından dolayı gerçekleştirmiş, ancak iki farklı besleme stoku kullanıldığı için homojen boşluk kontrolü sağlanamamıştır. Bu çalışmada ise montajlı parça üretiminde tek besleme stoku kullanılmış, sinterleme sıcaklığına bağlı olarak boşluk miktarının kontrolü sağlanmıştır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma bileşenler arası mikro boşluklu kendiliğinden montajlı küresel mafsal üretimi için toz enjeksiyon kalıplamada (TEK) yeni bir yöntem sunmaktadır. Bu yöntem insört hazırlanması, arayüzey oluşturulması enjeksiyon işlemi, bağlayıcı giderme ve sinterleme aşamalarını kapsamaktadır. Boşluk oluşumu deneysel, matematiksel ve teorik olarak incelenmiştir.

TEK’te krom arayüzey kullanılarak üç serbestlik derecesine sahip montajlı parça elde edilmiştir. Krom arayüzeyin

yüksek aktivasyon enerjisi, yüksek difüzyon katsayısı ve yüksek erime sıcaklığına sahip olmasıyla bileşenler arası arzu edilen homojen boşluk oluşturmuştur. Sinterleme öncesinde rijit yapıya sahip olan numune sinterleme sonrasında bileşenler arasında oluşan boşluk nedeniyle hareketli hale gelmiştir. Sinterleme sıcaklığı arttıkça kullanılan enjeksiyon malzemesinin çekmesi arttığı için bileşenler arasındaki boşluk miktarı azalmıştır. Krom kaplama kalınlığı boşluk oluşumuna etki etmemiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışmaya destek sağlayan 115M437 kodlu proje kapsamında TÜBİTAK’a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Akkoyunlu S., Küresel mafsalarda aşınma dayanımının incelenmesi ve iyileştirilmesi, Ege Üniversitesi, 2008.
2. Bosscher P. ve Ebert-Uphoff I., A novel mechanism for implementing multiple collocated spherical joints, in Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference on. 2003. IEEE.
3. YAVUZ H., Available from: blog.aku.edu.tr/hicri-yavuz/files/2017/07/hareket-kontrol-sistemleri-13.09.2017.pdf
4. Platzer W., Locomotor system, Cilt 1, Thieme, 313533306X, 2009.
5. Yang Y.-q., Su X.-b., Wang D. ve Chen Y.-h., Rapid fabrication of metallic mechanism joints by selective laser melting, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 225 (12), 2249-2256, 2011.
6. Piottter V., Hanemann T., Heldele R., Mueller, M., Mueller, T., Plewa, K. ve Ruh, A., Metal and ceramic parts fabricated by microminiature powder injection molding, International Journal of Powder Metallurgy, 46 (2), 21, 2010.
7. Attia U.M. ve Alcock J.R., A review of micro-powder injection moulding as a microfabrication technique, Journal of Micromechanics and microengineering, 21 (4), 043001, 2011.
8. German R.M., Powder injection molding, Princeton, NJ: Metal Powder Industries Federation, 1990.
9. Safarian A., Subaşı M. ve Karataş Ç., Reducing debinding time in thick components fabricated by powder injection molding, 7th International Powder Metallurgy Conference and Exhibition (TPM-7), Gazi University, Ankara, Turkey, 527-531, 24-28 June 2014.
10. Safarian A. ve Karataş Ç., Diffusion welding of thick components fabricated by inserted powder injection molding, Materials Testing, 56 (10), 842-846, 2014.
11. Safarian A., Subaşı M. ve Karataş Ç., The effect of sintering parameters on diffusion bonding of 316L stainless steel in inserted metal injection molding, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 89(5-8), 2165-2173.
12. Mizutani U., Hume-Rothery rules for structurally complex alloy phases, CRC Press, 1420090593, 2016.

13. Eroglu M., Khan T. ve Orhan N., Diffusion bonding between Ti-6Al-4V alloy and microduplex stainless steel with copper interlayer, *Materials science and technology*, 18 (1), 68-72, 2002.
14. Nicholas M. ve Crispin, R., Diffusion bonding stainless steel to alumina using aluminium interlayers, *Journal of Materials Science*, 17 (11), 3347-3360, 1982.
15. Zhao L. ve Zhang, Z., Effect of Zn alloy interlayer on interface microstructure and strength of diffusion-bonded Mg–Al joints, *Scripta Materialia*, 58 (4), 283-286, 2008.
16. Ruh A., Dieckmann, A.-M., Heldele, R., Piotter, V., Ruprecht, R., Munzinger, C., Fleischer, J. ve Haußelt, J., Production of two-material micro-assemblies by two-component powder injection molding and sinter-joining, *Microsystem Technologies*, 14 (12), 1805, 2008.
17. Osswald T.A., Turng, L.-S. ve Gramann, P.J., *Injection molding handbook*, Hanser Verlag, 1569904200, 2008.
18. Ogando J., Lost-core molding: Don't count it out yet, *Plastics technology*, 43 (9), 36-38, 1997.19. Goodship, V. ve Love, J., Multi-material injection moulding, *Cilt 13*, iSmithers Rapra Publishing, 1859573274, 2002.
19. Schittelkop V., *Injection molding machine for lost core technology*, Google Patents, 2011.
20. Chartier T., Delhomme, E., Baumard, J.F., Veltl, G. ve Ducloux, F., Injection moulding of hollow silicon nitride parts using fusible alloy cores, *Ceramics international*, 27 (7), 821-827, 2001.
21. Zhang X., You S., Xu W., Wang M., He T. ve Zheng X., Experimental investigation of the higher coefficient of thermal performance for water-in-glass evacuated tube solar water heaters in China, *Energy Conversion and Management*, 78, 386-392, 2014.
22. Williams N. ve Whittaker P., PM2010: Case studies highlight global success of Metal and Ceramic Injection Moulding, *Powder Injection Moulding International*, 4 (4), 48-54, 2010.
23. Attia U., Hauata M., Walton I., Annicchiarico D. ve Alcock J., Creating movable interfaces by micro-powder injection moulding, *Journal of Materials Processing Technology*, 214 (2), 295-303, 2014.
24. Sun, R., Diffusion of cobalt and chromium in chromite spinel, *The Journal of Chemical Physics*, 28 (2), 290-293, 1958.
25. Gale W.F. ve Totemeier T.C., *Smithells metals reference book*, Butterworth-Heinemann, 0080480969, 2003.
26. Takasawa K., Yamazaki Y., Takaki S., Abiko K. ve Iijima Y., Diffusion of Cr and Fe in a high-purity Fe-50 mass%Cr-8 mass%W alloy, *Materials Transactions*, 43 (2), 178-181, 2002.
27. Elementlerin fiziksel ve periyodik tabloda verilen özellikleri Available from: <http://www.periodictable.com/>.
28. Park M., Alexander K.C. ve Schuh C.A., Diffusion of tungsten in chromium: Experiments and atomistic modeling, *Journal of Alloys and Compounds*, 611, 433-439, 2014.
29. Keinonen J., Räisänen J. ve Anttila A., Diffusion of nitrogen in ion-implanted chromium and tungsten, *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 35 (4), 227-232, 1984.
30. Özel T. ve Zeren E., Finite element method simulation of machining of AISI 1045 steel with a round edge cutting tool, 8th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations, 533-542, 2005.
31. Fang Z.Z., Wang X., Ryu T., Hwang K.S. ve Sohn H., Synthesis, sintering, and mechanical properties of nanocrystalline cemented tungsten carbide—a review, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 27 (2), 288-299, 2009.
32. Powder injection molding technology for producing micro-size hinged parts., Google Patents, 2014
33. Xiongxiang, L., The new technology of fusible core injection moulding [J], *Engineering Plastics Application*, 8, 028, 2006.
34. Heim, H.-P. ve Potente, H., *Specialized molding techniques*, William Andrew, 188420791X, 2001.
35. Ananthanarayanan, A., Gupta, S.K., Bruck, .A., Yu, Z. ve Rajurkar, K.P., Development of in-mold assembly process for realizing mesoscale revolute joints, *North American Manufacturing Research Conference*, 1-8, May, 2007.
36. Schmidt, H., Lost core plastic molding process for transferring, positioning and molding inserts into a plastic part, Google Patents, 2008.