

Köpük Model Döküm Yöntemindeki Teknolojik Gelişmeler

Necati YALÇIN, Kadir KOCATEPE, Süleyman TEKELİ
Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal eğitimi Bölümü
06500 Teknikokullar, ANKARA

ÖZET

Köpük Model Döküm (KMD) Yöntemi ile döküm üretimi diğer döküm yöntemlerine göre yüksek boyut hassasiyeti, düşük maliyet, daha iyi döküm kalitesi ve daha az döküm hatası üretme gibi avantajlarından dolayı sürekli olarak artmaktadır. Köpük Model Döküm Yöntemi üzerindeki gelişmeler döküm ve model parametrelerinin belirlenmesi ve kontrolü üzerine odaklanmaktadır. Köpük Model Döküm Yönteminin kullanımı bu alanda teknolojik ve cihazların gelişimi ile birlikte artmaktadır. Ne var ki ülkemizde köpük model döküm yöntemi ile döküm üretimi ve bilimsel araştırmalar yok denecek kadar azdır.

Bu makale, Köpük Model Döküm Yöntemi üzerinde önemli gelişmeleri özetleyerek, yöntemin ülkemiz açısından önemini belirtmektedir.

Anahtar Kelimeler: Köpük model döküm yöntemi, döküm modelleri

Technological Development in Lost Foam Casting

ABSTRACT

Casting production by the lost foam casting process continuously increases comparing to other casting processes, since it offers many advantages such as high dimension accuracy, low cost, better casting quality and less casting defects. Developments in the lost foam casting process have focused on controlling the pattern and casting parameters. The use of lost foam casting process increases as technological and instrumental developments increases in this field. However, cast production and scientific researches on the lost foam casting process is quite limited in Turkey.

This paper summarizes some of the more recent developments in the lost foam casting process and emphasizes the importance of this process for Turkey.

Key Words: Lost foam casting process, casting pattern

1. GİRİŞ

Köpük model döküm (KMD) yöntemi ilk defa yaş kum kalıpta kullanılmıştır. Döküm işlemi yaş kum kalıpta model olarak bulunan polistiren köpük modelin üzerine yapılmıştır. Shroyer 1958 yılında bu yöntemi boşluksuz döküm olarak adlandırmış ve patentlendirmiştir (1). İlk yıllarda modellerin elde işlenmesi ve model malzemesi olarak kullanılan polistirenin çok fazla gaz ve sıvı atık üretmesinden dolayı kullanım alanı son derece sınırlı kalmıştır. Sadece birkaç basit döküm parçanın üretiminde kullanılan köpük model döküm yönteminde döküm sırasında meydana gelen gaz ve sıvı atıklar kalıptan tahliye edilememiş ve dolayısıyla gözenekli döküm parçalar elde edilmiştir [2-16].

Yöntem üzerinde en etkili çalışma 1964 yılında T.R. Simith tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada bağlayıcısız kum kullanılarak Köpük model döküm yönteminin çok iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Bu gelişme ile birlikte KMD yöntemi döküm sektöründe ilginin merkezi olan bir teknolojik yöntem olmaya başlamıştır (8-10, 14, 18).

1960 ve 1970'li yıllarda KMD yöntemi otomotiv şirketlerinin araştırmalarında önemli bir yer tutmaya başladı. Bu yıllarda KMD yöntemi ile çok az parça üretimi gerçekleştirilebildi. 1970'li yılların sonlarına doğru otomobil endüstrisinde özellikle büyük hacimli otomobil parçalarının dökümünde yaş kum ile KMD yönteminin kullanımı giderek artmaya başladı (5, 18). Bağlayıcısız kuru kumla köpük model döküm yöntemini 1980'li yıllarda birçok şirket kullanmayı amaçlasa da, bunların çoğu uygulamada başarı sağlayamadılar. Fakat ısrarlı çalışmalar sonucunda bazı şirketler bağlayıcısız kumla yapılan dökümlerde ilerleme sağlayarak döküm maliyetini düşürmeyi başardılar. Bununla beraber KMD yöntemi 1981 yılında Simith'in patentinin süresinin dolmasıyla ve teknolojik ilerlemelerle birlikte hızlı bir şekilde gelişmeye başladı (15). 1982'de karmaşık şekilli parçaların seri üretimine başlandı (5). 1989 yılında Amerikan Dökümcüler Birliği (American Foundrymen Society), üretim sektörü ve üniversitelerden oluşan bir konsorsiyum oluşturularak, ileri teknoloji bilimleriyle bu yöntem ilişkilendirildi ve böylece hızlı gelişmedeki ilk adımın atılması sağlandı. Teknolojik gelişme ve evrimlerle yöntem daha da gelişerek diğer alanlarda da önemli rol oynamaya başladı. Amerikan Dökümcüler Birliği (AFS)

1990 yılında bu yöntemi tanımlamak için harcanabilen (kaybolan) model dökümü (expendable pattern casting) adının kullanılmasına karar vermiştir (18). Günümüzde döküm yöntemleri için kullanılan teknolojik gelişmelerin birçoğu KMD yöntemi için de kullanılmaktadır.

2. KÖPÜK MODEL ÜRETİMİ

Dökümler köpük modelin tam bir temsili olduğu için KMD yöntemindeki ilk ve en önemli basamak kaliteli köpük model üretimidir. Kalıplama zamanı, kalıplama basıncı, yoğunluk, moleküler özellikler, ön şişirme süresi ve camlaşma sıcaklığı gibi kalıplama şartları köpük modelin özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Kaliteli bir döküm elde etmek için uygun malzeme kullanımı ve kalıplama şartlarının kontrol edilmesi zorunludur (19–23).

Polimer tipinin seçimi sıvı ve gaz şekline dönüşen atık ürün oranının kontrolünü sağlar (24). Genişleyebilen polistiren (Expandable Polystyrene (EPS)) birçok uygulama alanların yanında köpük model üretiminde de tercih edilmektedir. Değişik uygulamalar için farklı köpük malzemeleri mevcuttur. Model yapımında genişleyebilen polistirenin yanı sıra Polimetil Metakrilat (PMMA), EPS ve PMMA karışımı ve kopolimerler de kullanılmaktadır. Polialkilen Karbonat (PAK) karbonat dolayısı ile oluşan döküm hatalarını azaltacağı için geliştirilmektedir (5,15).

Model kalitesini belirlemede tane boyutu dağılımı, emdirilen şişirici madde miktarı, kullanılan polimerin cinsi ve polimerin molekül ağırlığı gibi değişkenler önemli granül özellikleridir. Granül boyutları yaklaşık olarak 0.25–0,4 mm arasında kullanılmakta, şişirici madde miktarı ağırlık olarak %6–8 arasında değişmektedir. Granüllere uygulanan ön şişirme işleminden sonra şişirici madde %2,5–4 seviyesine düşmektedir. Granüllerin molekül ağırlığı 150 000–300 000 aralığında uygulanmaktadır. Camlaşma sıcaklığı ve ön şişirme esnasındaki genleşme polimerin molekül ağırlığı ve kullanılan şişirici malzeme miktarı ile kontrol edilmektedir (18, 21).

Model üretiminin ilk aşaması olan polistirenin ön şişirme işlemi ısı kullanılır. Isı ile granüllerin hücre duvarı yumuşar ve granül içindeki hidrokarbon genişleyerek her bir granül boyutsal olarak büyür. Granüller böylece istenilen yoğunluğa ön şişirilirler. Ön şişirme işleminden sonra granüller durağan olana kadar oda sıcaklığında 24 saat veya hava üfleyerek 2 saat süre ile bekletilir. Durağan hale gelen ön şişirilmiş granüller metal kalıplara ya el ile yada otomatik olarak doldurulur. Kalıp boşluğuna doldurulan granüller basınçlı buhar yardımıyla tekrar ısıtılır. Belirli bir süre basınç altında tutulan granüller birbirine kaynadıktan sonra su veya vakumla soğutulur. Soğutma işleminden sonra kalıp açılarak model bir zemine veya su banyosu üzerine konulur. Modeller kalıptan çıkartıldıktan sonra soğutmanın etkisiyle yaklaşık %0.35 boyutsal olarak küçülürler. Şişirici madde ve buharın basıncı taneler içerisinde devam ettiği için modelde kısa bir süre için genişleme meydana

gelir. Modeller çekmeye başladıktan sonra şişirici maddeyi tekrar içeri alır ve buhar dışarı atılırken yerini hava doldurur. Boyut değişikliği yaşlandırma işlemiyle oda sıcaklığında 30 gün veya 55°C sıcaklıkta 2 saat sürede tamamlanır. Yaşlandırma işlemi sonucunda EPS ve kopolimerlerdeki toplam küçülme %0.65 olarak gerçekleşir (18, 25, 26).

2.1. Model Salkımı

KMD yönteminde modeller bir yapıştırıcı ile yolluk sistemine bağlanır ve model salkımı oluşturulur. Birleştirme işleminde en fazla kabul gören metot, sıcaklıkla eriyen bir yapıştırıcı madde ile model veya modellerin yolluk sistemine bağlanmasıdır. KMD yönteminde model salkımını oluşturmak için kullanılan yapıştırıcılar özeldir. Köpük model için kullanılan yapıştırıcının erime sıcaklığı diğer yapıştırıcılara göre daha düşüktür. Ayrıca kullanılan yapıştırıcı köpük modelle reaksiyona girmemelidir. Sağlam birleştirme ve ölçü tamlığı için otomatik veya yarı otomatik sistemler tercih edilmelidir (15).

2.2. Model Salkımının Kaplanması

KMD yönteminde model salkımının yüzeyini kaplamadan da uygulama yapmak mümkündür. Fakat yöntemin maksimum verimliliği için köpük model salkımının yüzeyini kaplamak her yönden avantajlıdır. Bu özel kaplama işleminin iki ana amacı vardır. Birincisi kum ile model arasında set oluşturarak döküm esnasında oluşabilecek kum düşmelerini ve kumdan dolayı oluşacak döküm hatalarını engellemek, ikincisi köpük modelin yanmasından dolayı oluşan atık ürünlerin (gaz ve sıvı polistiren) kaplamadan kuma kontrollü geçişini sağlamaktır. Kaplama geçirgenliği kalıbın dolmasında ve sıvı metalin ilerleyen yüzeyinin profilinin belirlenmesinde en önemli faktördür (13, 15, 27–38).

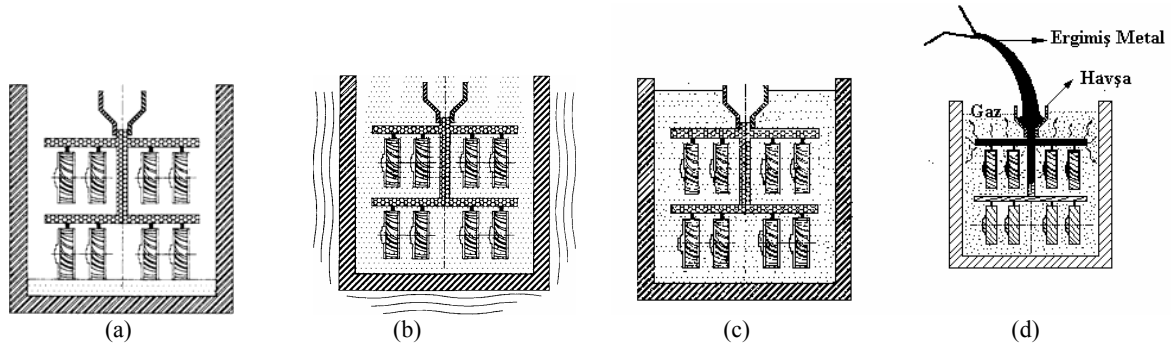
Kaplamanın hazırlanması ve kontrolü kaliteli döküm parça üretimi için gereklidir. Kaplama refrakter malzemesi uygun bir karıştırma işleminden sonra salkım şeklindeki köpük model yüzeyinin tamamına daldırma, fırça ile sürme, püskürtme veya yıkama metodu ile kaplanır (15, 30). Kaplamanın kurutulması için köpük model salkımı oda sıcaklığında 24 saat veya 50–65°C sıcaklığındaki fırınlarda 2–6 saat süre ile bekletilir. Fırınlarda her saatte bir havalandırılarak içeride oluşan nem dışarı atılır (5, 12, 15).

2.3. Model Salkımın Kalıplanması

Köpük model salkımın kalıplama işlemi derece içinde köpük model etrafının kuru ve bağlayıcısız kum ile doldurulmasıyla gerçekleştirilir. Kum yağmurlama yöntemiyle derece içerisine dökülür. Salkımın zarar görmemesi için minimum yükseklikten doldurma işlemi gerçekleştirilir. Kumun tane şekli ve boyutu sıkıştırılabilirlik ve kalıp içerisinde oluşan atık ürünlerin dışarı atılması açısından önemlidir. Kalıp yapımında kaba yuvarlak veya köşeli kuru kumlar kullanılmaktadır. Bu özellikteki kumlar döküm esnasında oluşan gazların rahat bir şekilde kalıp dışına atılmasını sağladığı gibi daha

çabuk kalıp doldurma ve sıkıştırma imkânı da sağlarlar (3, 18).

Alüminyum dökümler için yüzeydeki kaplamayı temizlemede sulu sistemler de kullanılabilir (15).



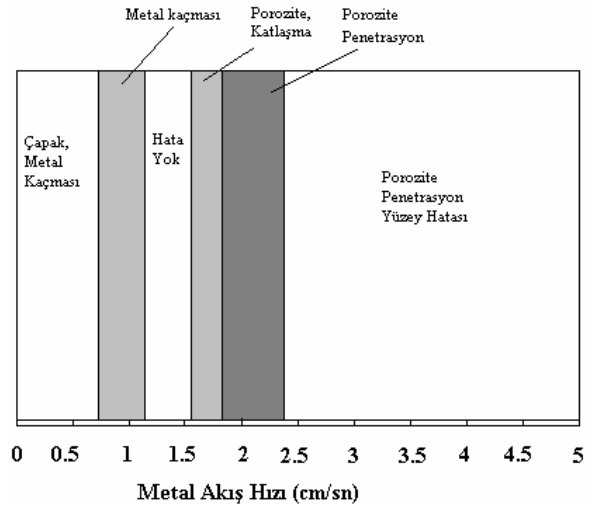
Şekil 1: Yöntemin döküm aşamaları, a) model salkımın kum üzerine sabitlenmesi, b) kumun doldurulması ve vibrasyon, c) döküme hazır kalıp, d) ergimiş metalin kalıba dökümü (15).

Derecenin doldurulması sırasında yüksek frekansa sahip mekanik titreşimli sıkıştırma tezgâhları kullanılır. Mekanik titreşim derecesine derecenin alt ve yan kenarlarından uygulanmaktadır. Bu şekilde yerleştirilen vibrasyon cihazları yatay, dikey ve her iki yönde hareket sağlayarak kumun model salkımın her noktasına ulaşmasını ve sıkışmasını sağlamaktadırlar. Değişik frekans ve genlik değerleri köpük model salkımı etrafındaki kumun tamamen sıkıştırılması için gereklidir (5, 15, 39–44). Şekil 1’de bir model salkımın kalıplanma ve döküm aşamaları verilmiştir.

3. KUM SİSTEMİ

En çok kullanılan kum silika kumudur. Kumun geçirgenliği için tane dağılımı önemli bir rol oynamaktadır. Farklı uygulamalar için farklı boyutta ve dağılımda kum kullanılmaktadır. Genellikle demir alaşımlarının dökümünde 35 AFS tane incelik numarası ve 3 elek dağılımlı, demir dışı alaşımların dökümünde 45 AFS tane incelik numarası ve 3 elek dağılımlı kum kullanılmaktadır. Döküm kumunun doldurma işleminden önce sıcaklığı kontrol edilmeli ve 50 °C’nin altına soğutulmuş olmalıdır. Aksi halde köpük model zarar görebileceği gibi yapıştırıcılar çözünerek istenmeyen sonuçların oluşmasına sebep olabilir (15, 26, 45).

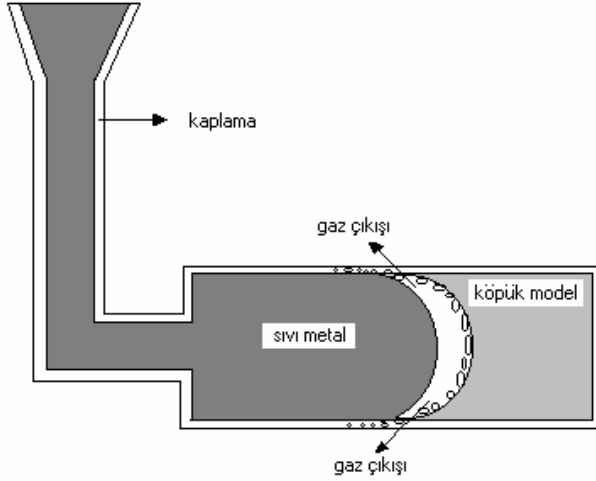
KMD yönteminde döküm işlemi, geleneksel döküm yöntemlerinde kullanılan metodun aynısıdır. Metal beslemesi köpük modelin yanma hızı tarafından kontrol edilir. Metal sıcaklığı ve dolma zamanı diğer döküm yöntemlerine göre çok farklı olduğundan kritiktir ve mutlaka kontrol edilmesi gerekir (48). Şekil 2’de metal akış hızının hangi döküm hatalarına sebebiyet verdiğini gösteren akış şeması görülmektedir. Dökümler döküm işleminden sonra geleneksel döküm yöntemlerinde olduğu gibi soğumaya bırakılır. Dereceler döküm parçaları kalıptan çıkarılması için kalıp bozma alanına götürülür ve döküm parçalar soğuduktan sonra dereceler ters çevrilip boşaltılarak kumun içinden alınır. Döküm parçaların yollukları ayrıldıktan sonra yüzeydeki kaplamanın giderilmesi için temizleme işlemine tabi tutulur. Kumlama ve titreşimle temizleme metotları kullanılır.



Şekil 2. Metal akış hızına göre oluşan döküm hataları (48)

4. METAL-MODEL ETKİLEŞİMİ

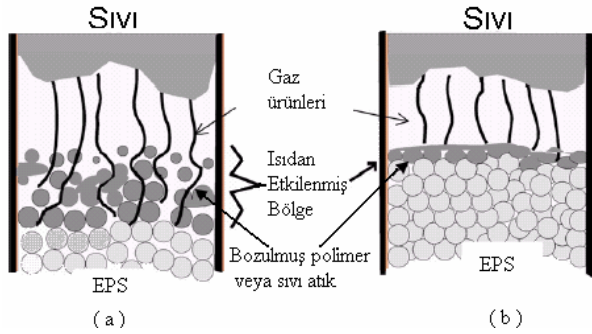
KMD yönteminde ısı ve parça transfer yöntemleri geleneksel döküm yönteminkinden daha karmaşıktır. Polistiren köpüğün kalıp içerisinde ayrılması ergimiş metalin köpük modeli yakmasıyla gerçekleşir. Ergimiş metal köpük modelin ve modele bağlanmış olan bütün yolluk sisteminin yerini alır. Şekil 3’de ergimiş metal tarafından köpük modelin yerini alma mekanizması görülmektedir. Isı ve kütle transferinin meydana geldiği ergimiş metal ile model arasındaki bozulan bölgeye metal-model arayüzeyi (kinetik bölge) denir. Metal-model arayüzeyi sıvı polimer, köpüğün yanması sebebiyle oluşan gaz ve havadan meydana gelmektedir. Bu modeldeki arayüzeyin genişliği ve gazın gerçek miktarı, metalin akış hızına, polistiren taneler arası kaynama derecesine ve akan sıvı metalin uc noktasındaki sıcaklığına bağlıdır (2, 46, 47).



Şekil 3. Kum kalıp içerisindeki modelin sıvı metal ile doldurulması (2,48)

Kalıbın ergimiş metalle doldurulması esnasında meydana gelen gaz ürünlerinin oluşum hızı metalin akış hızına, akan sıvı metalin ucundaki sıcaklığına ve köpük modelin yoğunluğuna bağlıdır. Oluşan gaz ürünlerinin kalıptan çıkış hızı metalin statik basıncına, kaplama ve model gözenekliliğine ve etkili kaplama alanına bağlıdır. Etkili kaplama alanı sıvı polistiren tarafından ıslatılmayan yüzey alanıdır. Etkili kaplama alanı bölgesel metal alanının oranı, modelin yüzey pürüzlülüğü, viskozite ve sıvı polistirenin yüzey geriliminden etkilenebilmektedir (46, 49, 50).

Kaplama sırasında meydana gelen tane kaynaması, kalıbın sıvı metalle doldurulması sırasında önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 4'de görüldüğü gibi düşük kaynama derecesine sahip modellerin dökümünde metalin arayüzeydeki şekli girintili ve arayüzey genişliği daha uzun olduğu görülmektedir (19).



Şekil 4. Metal-model arayüzeyindeki değişimin şematik olarak gösterimi (a) düşük kaynama derecesine sahip köpük modeller (b) yüksek kaynama derecesine sahip köpük modeller (19).

5. KÖPÜK MODEL DÖKÜM YÖNTEMİNİN AVANTAJLARI

Yöntemin döküm parça üretimine sağladığı birçok faydaları vardır. Bunların en basitleri modellerin kalıp ayırma yüzeyleri ve maçalarının olmaması ve kalıplamada tek parçalı derecelerin kullanılmasıdır. İşlem-

siz ve bağılayıcısız kum kullanımı kum sisteminde kolaylıklar sağlar. Daha az el takımlarına ihtiyaç duyulur ve ekolojik olarak kumun döngüsünde avantajlar sağlar (15,51).

Köpük model döküm yönteminin en önemli avantajlarından bir diğeri de kum kalıplamada kuma herhangi bir ilave malzemesinin kullanılmamasıdır. Bu durum işlem sayısını ve atık madde miktarını azaltır (44, 52).

Tek parçalı derece dizaynı, boyut standardı ve otomatik kalıplamaya imkan verir ve birçok problemin elimine edilmesini sağlar (5, 52).

Maça kullanılmasına gerek olmadığı için maça makinasına, maça bağlayıcılarına, maça kumuna gerek duyulmaz ve maçadan kaynaklanan döküm hataları ortadan kalkar (5, 44, 52).

Köpük model döküm yönteminde sıvı metal kum ile temas etmeyeceğinden kum inklüzyonları oluşmaz. Bu durum döküm kalitesine etki ettiği gibi, inklüzyonlardan dolayı meydana gelebilecek takım ve kesici aşınmalarını da engeller (4, 5, 6, 52).

Köpük model dökümünde metal akış hızı boş kalıba dökümdeki akış hızından daha yavaş ve kontrolüdür. Kalıp dolu olduğundan içerideki hava miktarı daha azdır ve döküm sırasında oksitten kaynaklanabilecek döküm hatası olasılığı daha düşüktür (5, 11, 52-54).

Akan sıvı metalin uç noktası polistiren köpükle temas ettiği için kalıp sonuna doğru metal sıcaklığında düşme meydana gelir. Bu durum metalde yönlü katılaşmayı gerçekleştirir ve katılaşma çekmesinin yolluk sistemi tarafından beslenmesini sağlar (52, 55, 56, 57).

Döküm parçasının kalıptan çıkartılması geleneksel döküm kalıp bozma ve temizleme işlemlerinin elimine edilmesini sağlar. Birçok dökümcüye göre temizleme ve kalıp bozma işlemleri dökümlerin maliyetini önemli ölçüde artırır. Temizleme işlemi sırasında döküm parçaların bir kısmı ya ezilerek ya kırılarak zarar görmektedir. Köpük model döküm yönteminde temizleme işlemi geleneksel döküm yöntemindeki temizleme işleminin çok küçük bir bölümünü kapsar. Buda temizleme esnasında meydana gelebilecek hata oluşumunu engeller (5, 44, 52).

Döküm parçalarının kalıplanmasında tek parçalı derece kullanımı, seri kalıplama imkanı, işçiliğin ve proses kontrolünün kolay olması, serbest parça tasarım imkanı ve büyük hacimli döküm özelliği, maça ve maça temizleme makinalarına ihtiyaç olmaması bu yöntemin diğer önemli avantajlarıdır (15).

Bu avantajlar köpük model döküm yönteminin tercih sebebidir. Bu yöntem geleceğin dökümcüleri için bağımsız bir şekilde tasarım yapmayı sağlayacaktır. Böylece karmaşık ve gelişmiş döküm parçaları bu yöntemle tasarlanıp üretilebilir (5, 51, 52). Köpük model döküm yöntemi bu avantajlarından dolayı birçok döküm yönteminin yerini almaya başlamıştır (15).

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Köpük model döküm yöntemindeki gelişmelerin 1958 yılından bu yana oldukça geliştiği görülmektedir. Gelişmekte olan KMD yöntemi kullanılmaya başlanmakla birlikte kaliteli ve sağlam döküm parça üretmek için gerekli olan model ve döküm parametrelerinin belirlenmesi üzerine çalışmalar devam etmektedir. Bu parametreler model üretim aşamasındaki değişkenler, kum ve kaplama özellikleri, kum sıkıştırma tekniği, yolluk tasarımı vb. konular üzerinde yoğunlaşmaktadır.

1981 yılında Smith'in patentinin süresinin dolmasıyla ve teknolojik ilerlemelerle birlikte özellikle seri model üretim çabalarında artış gözlenmektedir.

Ülkemizde büyük hacimli modeller ambalaj işleminde kullanılan sert polistirenden yapılmaktadır. Modeller kütle halindeki köpük bloklardan kesilerek yapıştırmak suretiyle oluşturulmaktadır. Bu şekilde model üretimi istenilen model boyut hassasiyetini vermemekte ve döküm sırasında model daha fazla atık ürün meydana getirmektedir.

Köpük model döküm yönteminde ön şişirilmiş granüller bir kalıp içerisinde şekillendirilerek yüksek boyut hassasiyetine sahip modeller üretilebilir. Bu işlem için gerekli olan kalıplama üniteleri ve kalıp maliyetleri seri üretim ile kısa zamanda elimine edilebilir.

Döküm aşamasındaki kalıplama özelliklerinden dolayı parça tasarımına sağladığı sınırsız tasarım imkânı, bu yöntemi cazip hale getirmektedir. Dünya döküm sektöründe bu yöntemin değişkenleri üzerine son yıllarda yapılan çalışmalardan da görülebileceği gibi bu yöntem büyük bir gelişme içerisinde. Bu nedenle bu gelişme ve araştırmaların önümüzdeki yıllarda da giderek artan bir hızda devam etmesi beklenebilir.

TEŞEKKÜR

Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Müdürlüğü 07/2003-30 nolu proje kapsamında verilen destekten dolayı Gazi Üniversitesi Rektörlüğü'ne ve çalışmaların çeşitli aşamalarında önemli katkılar sağlayan Nova Kimyasal A.Ş.'den Mehmet Parlak beye teşekkür ederiz.

7. KAYNAKLAR

- Shroyer H.F., Cavityless Casting Mold and Method of Making Same, United States Patent Office, 2 830 343, 1958.
- Molibog, T.V., Littleton, H., Experimental Simulation of Pattern Degradation in Lost Foam, AFS Transactions, 109, 1523-1555, 2001.
- Kotzin, E.L., Metal Casting and Molding Processes, AFS Transactions, 89, 148-161, 1981.
- Sikora, E.J., Evaporative Casting Using Expandable Polystyrene Pattern and Unbonded Sand Casting Techniques, AFS Transactions, 86, 65-68, 1978.
- Patz, M., Lost Foam Process Update, AFS Transactions, 93, 901-902, 1985.
- Flemings, M.C., Foam Vaporization Casting, AFS Transactions, 95, 665-672, 1987.
- Vinarcik, E.J., Thermo Gravimetric Analysis of Expendable Pattern Casting Adhesives, AFS Transactions, 105, 355-357, 1997.
- Liu, J., Hu, J., Ding, W., Wang, Q., Zhu, Y., Lu, Y., Chen, W., Effects of Processing Parameters on Mold Filling in Magnesium Alloy LFC Process, AFS Transactions, 109, 1425-1438, 1997.
- Pan, E.N., Sheu, G.L., Mold Filling Behavior In Vertical Gating Lost Foam Aluminum Alloy, AFS Transactions, 109, 1503-1521, 2001.
- Zili, L., Hu, J., Wang, Q., Ding, W., Zhu, Y., Lü, Y., Chen, Evaluation of The Effect of Vacuum on Mold Filling in The Magnesium EPC Process, Journal of Materials Processing Technology, 120, 94-100, 2002.
- Fu, J., Tsai, H.L., Askeland, D.R., Mold Filling in Thin-Section Castings Produced by the EPC Process, AFS Transactions, 103, 817-828, 1995.
- Chen, Y.F., Chen, R.C., Hwang, W.S., Mold filling Study in the EPC process—Mathematical Model and Flow Characteristics, AFS Transactions, 105, 459-464, 1997.
- Wang, C., Ramsay, C.W., Askeland, D.R., Processing Variable Significance on Filling Thin Plate in the LFC Process—The Staggered, Nested Factorial Experiment, AFS Transactions, 105, 427-434, 1997.
- Pan, E.N., Liao, K.Y., Study on Flowability of EPC A356 Al Alloy, AFS Transactions, 106, 233-242, 1998.
- Patz, M., Unbonded Sand Molds, ASM Handbook Comminute, ASM Handbook, USA, ASM, 15, 231-237, 1992.
- Venkataramani, R., Ravindran, C., Effect of Coating Thickness and Pouring Temperature on Response in Lost Foam Casting, AFS Transactions, 104, 281-290, 1996.
- Smith R.T., Method of Casting, United States Patent Office, 3 157 924, 1964.
- Bates, C.E., Littleton, H.E., McMellon, B., Stroom, P.A., Technological Developments and Worldwide Market Growth in Lost Foam Casting Production, AFS Transaction, 109, 1557-1572, 2001.
- Rossacci, J., Shivkumar, S., Influence of EPS Bead Fusion on Pattern Degradation and Casting Formation in the Lost Foam Process, Journal of Materials Science, 38, 2321-2330, 2003.
- Sands, M., Shivkumar, S., EPS Molecular Weight and Foam Density Effect in the Lost Foam Casting, Journal of Materials Science, 38, 2233-2239, 2003.
- Rossacci, J., Shivkumar, S., Bead Fusion in Polystyrene Foams, Journal of Materials Science, 38, 201-206, 2003.
- Liu, J., Ramsay, C.W., Askeland, D.R., Effects of Foam Density and Density Gradients on Metal Fill in the LFC Process, AFS Transactions, 105, 435-442, 1997.,.
- Guohua, W., Jirong, L., Naiyu, H., Study on Porosity of Al Alloy in LFC Process, AFS Transactions, 108, 377-381, 2000.
- Yao, X., Shivkumar, S., Mold Filling and Solidification in the Lost foam Process, AFS Transactions, 103, 761-765, 1995.

25. Brydson, J.A., *Plastics Materials*, Butterworth & Heinemann, London 1988.
26. Gallois, B., Behi, M., Panchal, J.M., *Polystyrene in the Full-Mold Casting of Gray Iron*, AFS Transactions, 95, 579-590, 1987.
27. Bambauer, R.A., Lee, T., DeLong, T., *Effect of Continuous Mixing on Viscosity and Permeability of an Iron Lost Foam Casting: A Joint Study*, AFS Transactions, 104, 329-333, 1996.
28. Kocan, G.H., *Incorporating Permeability into Lost Foam Casting Control*, AFS Transactions, 104, 565-569, 1996.
29. Tseng, C.H.E., Askeland, D.R., *Thermal and Chemical Analysis of the Foam, Refractory Coating and Sand in the EPS Process*, AFS Transactions, 100, 509-518, 1992.
30. Marchisin, W.A., *Refractory Coating Selection and Control for the Lost Foam Casting Process*, AFS Transactions, 109, 1489-1494, 2001.
31. Gorla, C.A., Serramogha, G., Caironi, G., Tosi, G., *Coating Permeability: Critical Parameter of the Evaporative Pattern Process*, AFS Transactions, 94, 589-600, 1986.
32. Lawrance, M.D., Ramsay, C.W., Askeland, D.R., *Some Observation and Principles for Gating of Lost Foam Casting*, AFS Transactions, 106, 349-356, 1998.
33. Salah, D., Eigenfeld, K., Tilch, W., *Reactive Lost Foam Casting*, Proceedings of the 65th World Foundry Congress, KOREA, 1015-1022, 2002.
34. Sands, M., Shivkumar, S., *Influence of Coating Thickness and Sand Fineness on Mold Filling in the Lost Foam Casting Process*, Journal of Materials Science, 38, 667-673, 2003.
35. Simpson, R., Ravindran, C., *Solidification Process Modeling of Chills in LFC of A356 Alloy: Preliminary Study*, AFS Transactions, 104, 1133-1141, 1996.
36. Miyake, H., Yamamoto, Y., Manabe, T., Okado, A., *Necessity of Exhaust Gas Treatment in Evaporative Pattern Casting*, AFS Transactions, 109, 1417-1424, 2001.
37. Yang, J., Huang, T., Fu, J., *Study of Gas Pressure in EPC (LFC) Molds*, AFS Transactions, 106, 21-26, 1998.
38. Shih, T.S., Chang, A.S., *Filling of A356 and Gray Iron in the EPC Process*, AFS Transactions, 105, 377-390, 1997.
39. Ikenaga, A., Kuraoka, S., Kawamoto, M., *Performance of Rotary Vibration Table for Compaction of Molding Sand*, AFS Transactions, 106, 1-5, 1998.
40. Kuraoka, S., Bosscher, P.J., *Numerical Simulation of Circulation Flow of Granular Materials during Vertical Vibration*, AFS Transactions, 104, 619-624, 1996.
41. Vatankhah, B., Sheldon, D., Littleton, H.E., *Optimization of Vibratory Sand Compaction*, AFS Transactions, 106, 787-796, 1998.
42. Ravindran, C., Jue, B., Karpynczyk, J., *Study of Effect of Vibration on Permeability of Unbonded Sand in EPC*, AFS Transactions, 102, 915-920, 1994.
43. Wegscheid, E.L., *Sand Vibration for the Lost Foam Process*, AFS Transactions, 98, 631-639, 1990.
44. Bakhtiyarov, S.I., Overfelt, R.A., Alagarsamy, A., *Measurement of Decomposed EPS Gases Pressure and Molten Metal-Polymeric Foam Interface Velocity During Counter Gravity Lost Foam Casting*, AFS Transactions, 109, 1439-1453, 2001.
45. Buesch, A., Carney, C., Moody, T., Wang, C., Ramsay, C.W., Askeland, D.R., *Influence of Sand Temperature on Formation of Pyrolysis Defect in Al Lost Foam Castings*, AFS Transactions, 108, 615-621, 2000.
46. Molibog, T., 2002, *Modeling of Metal/Pattern Replacement in the Lost Foam Casting Process*, PhD, The University of Alabama, 1-10, ALABAMA.
47. Fu, J., Tsai, H.L., Askeland, D.R., *Transport of Foam Decomposition Products into the Sand in the Lost Foam Casting Process*, AFS Transactions, 104, 263-270, 1996.
48. Hill, M., Vrieze, A., Moody, T., Ramsay, C.W., Askeland, D.R., 1998, *Effect of Metal Velocity on Defect Formation in Al LFCs*, AFS Transactions, 106, 365-374.
49. Liu Y., Bakhtiyarov, S.I., Overfelt, R.A., *Numerical Modeling and Experimental Verification of Mold Filling and Evolved Gas Pressure in Lost Foam Casting Process*, Journal of Materials Science, V37, 2997-3003, 2002.
50. Shivkumar, S., *Ablation of PMMA by Liquid Metals*, AFS Transactions, 101, 519-524, 1993.
51. Tschopp, M.A., Ramsay, C.W., Askeland, D.R., *Processing Variable Significance on Metal Flow and Defect Formation in Thick Section LFCs—Full Factorial Experiment*, AFS Transactions, 108, 267-274, 2000.
52. Gurdogan, O., Huang, H., Akay, H.U., Fincher, W.W., Wilson, V.E., *Mold Filling Analysis for Ductile Iron Lost Foam Castings*, AFS Transactions, 104, 451-459, 1996.
53. Mehta, S., Shivkumar, S., *Fluidity of Al Alloys and Composites in the Lost Foam Process*, AFS Transactions, 103, 663-668, 1995.
54. Liu, J., Ramsay, C.W., Askeland, D.R., *Study on Mold Filling Control Mechanisms in the EPC Process*, AFS Transactions, 102, 903-914, 1994.
55. Hill, M.W., Lawrence, M., Ramsay, C.W., Askeland, D.R., *Influence of Gating and Other Processing Parameters on Mold Filling in the LFC Process*, AFS Transactions, 105, 443-450, 1997.
56. Bennett, S., Ramsay, C.W., Askeland, D.R., *Temperature Gradients during fill and solidification of Al LFCs*, AFS Transactions 106, 357-363, 1998.
57. Shivkumar, S., Wang, L., Steenhoff, B., *Metallurgical Quality of Aluminum Castings Produced by the Lost Foam Process*, AFS Transactions, 97, 825-836, 1989.