

KALIP SICAKLIĞININ DÖKÜM PARÇA-KALIP ARAYÜZEY ISI TRANSFER KATSAYISI ÜZERİNE ETKİSİ

Neşet AKAR^{*1}, Kurtuluş BORAN², Bahadır HOZİKLİĞİL³

¹ Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Beşevler-ANKARA

² Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Beşevler-ANKARA

³ MSB, Ankara İnşaat Emlak Bölge Başkanlığı, Kirazlıdere-ANKARA

nakar@gazi.edu.tr, kboran@gazi.edu.tr, bahad58@hotmail.com

(Geliş/Received: 06.06.2012; Kabul/Accepted: 28.02.2013)

ÖZET

Döküm parça-kalıp arayüzündeki ısı transfer katsayısı döküm parçada yapısal ve mekanik özellikleri belirleyen, katılma hızını kontrol eden önemli bir faktördür. Arayüzey ısı transfer katsayısı yüzey pürüzlülüğü, kalıp malzemesi, alaşım tipi, katılma yönü, kalıp ve döküm sıcaklıkları, kalıbın genleşmesi, metalin çekmesi ve ara yüzeyde oluşan hava boşluğu gibi birçok parametreden etkilenir. Bu çalışmada arayüzey ısı transfer katsayısının kalıp sıcaklığı ile değişiminin araştırılması ve kalıp sıcaklığına bağlı ara yüzey ısı transfer mekanizmalarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Farklı ön ısıtma sıcaklığına (323 K, 373 K, 423 K) sahip saf bakır soğutucudan ve 1023 K sıcaklıkta dökülen soğutucuya karşı yerçekimine karşı yönde katılan ticari ETIAL-220 döküm alaşımından zamana bağlı sıcaklıklar ölçülmüştür. Ölçülen sıcaklıklar kalıp sıcaklığının döküm parça-kalıp arayüzey ısı transfer katsayısına etkisini belirlemek için kullanılmıştır. Döküm parça-kalıp arayüzey ısı transfer katsayısı soğutucu (kalıp) sıcaklığının artmasıyla artmıştır. 323 K, 373 K, 423 K soğutucu sıcaklıkları için maksimum arayüzey ısı transfer katsayıları sırası ile 12 000 W/m²K, 20 000 W/m²K ve 25 000 W/m²K olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Döküm parça-kalıp arayüzeyi, ısı transfer katsayısı, kalıp sıcaklığı

EFFECT OF MOLD TEMPERATURE ON HEAT TRANSFER COEFFICIENT AT CASTING-MOLD INTERFACE

ABSTRACT

The heat transfer coefficient on the casting-mold interface is an important factor which determines the structural and mechanical properties of the casting, and controls the solidification rate of the casting. It is affected by many parameters such as surface roughness, mould material, type of alloy, direction of solidification, mould and casting temperatures, expansion of the mold, contraction of the metal, and air gap on the interface. In this study, it is aimed to investigate the change of the interfacial heat transfer coefficient with temperature of the mold, and to identify the metal-mold interfacial heat transfer mechanisms depending on the temperature of the mold. Time-temperatures relationships were measured with copper chill having different preheat temperatures (323 K, 373 K, and 423 K) in upwards solidifying commercial ETIAL-220 aluminum alloy which is poured at 1023 K. The measured temperatures have been used to determine the effect of mould temperature on the interface heat transfer coefficient. The casting-mold interfacial heat transfer coefficient increased with increasing preheat temperature of the chill (mold). Maximum interface heat transfer coefficients for 323 K, 373 K, 423 K chill temperatures was calculated 12 000 W/m²K, 20 000 W/m²K and 25 000 W/m²K, respectively.

Keywords: Casting-mold interface, heat transfer coefficient, mold temperature.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sıvı metal kalıp boşluğunu doldururken ve kalıp boşluğunu doldurduktan sonra sıvı metalin ısı kalıp duvarı tarafından önce kalıba oradan da çevreye transfer olur. Kalıp ve döküm alaşımının yüksek ısı iletkenliğe sahip olduğu durumda döküm parça-kalıp arayüzeyin ısı direnci ısı transferini ve soğuma hızını kontrol eder. Bu direnç genellikle ısı transfer katsayısı (h) terimi ile ifade edilir. Isı transfer katsayısı zamana bağlı olarak değiştiği için döküm parçadan kalıba olan ısı akışında arayüzeyin gösterdiği direncin gerçekçi olarak belirlenmesi zordur. Arayüzey direnci metalik kalıp ve basınçlı dökümler başta olmak üzere birçok endüstriyel döküm yöntemlerinde özellikle önemlidir.

Son yirmi yılda, döküm proseslerinin tasarımı ve kalite açısından optimizasyonu büyük ölçüde döküm simülasyon yazılımlarının kullanımına paralel olarak artmıştır. Günümüzde birçok dökümhanede dökümlerin üretim dizaynı öncelikle bilgisayar ortamında yapılarak hata oranı minimuma indirilir. Döküm simülasyon sınır şartlarından biri olan arayüzey ısı transfer katsayısı (AITK), katılma sürecini doğru modelleme açısından özellikle önemlidir. Sıvı metalden kalıba transfer olan ısı, döküm parça-kalıp AITK ile belirlenir. Döküm parça-kalıp AITK, nümerik simülasyon teknikleri ile katılma modelinin kesin ve gerçekçi bir şekilde yapılabilmesi için çok kritik bir parametredir [1,2]. Fakat AITK birçok faktörden etkilendiği için döküm simülasyonunda AITK sınır şartını belirlemek oldukça karmaşık bir durumdur. Dolayısı ile her döküm şartı ve faktör için ayrı ayrı AITK gerçek durumda belirlendikten sonra bu değerlerin döküm simülasyonunda kullanılması gerekir.

AITK etkileyen önemli parametrelerden birisi kalıp sıcaklığıdır. Metalik kalıplarda sürekli döküm yapıldığı için kalıp ısınır. Isı transferi üzerinde kalıp sıcaklığının etkisi çok az araştırmacı tarafından çalışılmıştır.

Srinivarsan [3] gri dökme demir için kalıp sıcaklığının 250 °C'den 150 °C'ye düşürüldüğünde AITK'nın yaklaşık iki kat arttığını bildirmiştir. Michel [4] değişik kaplama kalınlığı ve değişik alaşım kompozisyonlarında ısı transferi üzerinde kalıp sıcaklığının etkisini incelemiştir. Araştırma sonucunda kaplamasız kalıbın sıcaklığı 200 °C'den 300 °C'ye yükseldiğinde Al-%6Si alaşımında AITK azalırken Al-%13Si alaşımında önemli derecede artmıştır. Kaplamalı kalıplarda ise kalıp sıcaklığının artması ile bütün alaşım kompozisyonlarında AITK bir miktar artmıştır.

Hallam ve Griffiths [5] yüzeyi kaplanmış ve 30 °C ve 300 °C ön ısıtılmış çelik soğutucuya Al-%13Si alaşımının dökümünde AITK'nın arttığını bildirmişlerdir.

Bouchard ve arkadaşları [6] saf bakır yüzeyinde sıvı alüminyum damlacığının dinamik ısıtma ve ısı transferi özelliklerini incelemiştir. Araştırmacılar kalıp sıcaklığının artması ile ısı transferinin arttığını belirlemişlerdir.

Gozlan ve Bamberger [7] kalıp malzemesi olarak kullandıkları yüzeyi grafit kaplanmış ve 225–400 °C arasında ön ısıtma yapılmış AISI H-19 çelik kalıba alüminyum bronz dökümü yapmışlardır. Araştırmacılar 300 °C'de maksimum ısı akışı ve soğuma oranı elde etmişlerdir.

Günümüzde mikro ve makro yapı, porozite, döküm parçanın ısı gerilim analizi, döküm parçadan ısı transfer hızı gibi parametreleri esas alan döküm simülasyonlarının daha doğru yapılabilmesi için döküm parça-kalıp AITK araştırmaları çok yoğun olarak devam etmektedir.

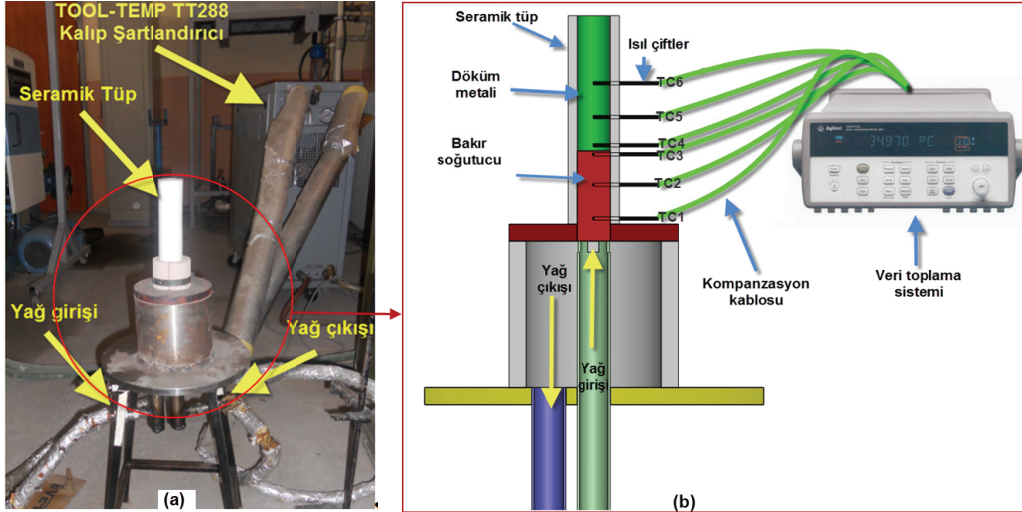
Metalik kalıplara (kokil kalıba döküm, alçak basınçlı döküm ve yüksek basınçlı döküm) yapılan dökümlerde kaliteli parça üretimi için kalıp sıcaklığının sabit tutulması gerekir. Bu da en hassas olarak kalıp şartlandırıcısı yardımı ile yapılabilmektedir. Kalıp şartlandırıcısı ısı transfer yağını belirlenen sıcaklıkta tutarak kalıp sıcaklığının sabitlenmesini sağlar. AITK ile ilgili yapılan araştırmalarda soğutma sıvısı olarak büyük çoğunlukla su kullanılmış veya hiç soğutma sıvısı kullanılmamıştır.

Bu çalışmada özellikle soğutma veya ısıtma sıvısı olarak ısı transfer yağı kullanılmış ve kalıp sıcaklığına bağlı AITK'ları belirlenmiştir.

Bu çalışmanın amacı döküm parça-metal kalıp AITK'nın ısı transfer yağı ile ısıtılmış kalıp sıcaklığına bağlı olarak değişimini incelemek ve bu değişime sebep olan etkili mekanizmaları ortaya çıkarmaktır.

2. MALZEME VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Şekil 1'de fotoğrafı ve şematik görünümü verilen deney düzeneği ile ısı transferinin hesaplanmasında kullanılan döküm ve kalıp sıcaklıkları belirlenmiştir. Çukurova Kimya'nın ürettiği iç çapı 30 mm yüksekliği 150 mm ve kesit kalınlığı 8 mm olan alümina-silikat seramik malzemedan yapılmış olan seramik tüpler kullanılarak ısı akışının tek yönlü olması sağlanmıştır. Isıl çiftlerin yerleştirilebilmesi için seramik tüplere arayüzeyden 5 mm (TC4), 30 mm (TC5) ve 60 mm (TC6) mesafelerde delikler açılmıştır. Sıcaklık ölçümünde 1,5 mm çapında K tipi mineral izoleli ısı çiftleri kullanılmıştır. Deneylerde soğutucu olarak Şekil 1'de şematik görünümü verilen 30 mm çapında ve 90 mm boyunda hazırlanan elektrolitik saflıkta bakır kullanılmıştır. Soğutucuya yerleştirilecek ısı çiftleri için her biri 1,5 mm çapında



Şekil 1. Deney setinin (a) fotoğrafı ve (b) şematik görünümü. ((a) Photo image and (b) schematic representation of the experimental setup)

ve 15 mm derinliğinde soğutucu yüzeyinden 5 mm (TC1), 37,5 mm (TC2) ve 75 mm (TC3) mesafelerde delikler açılmıştır.

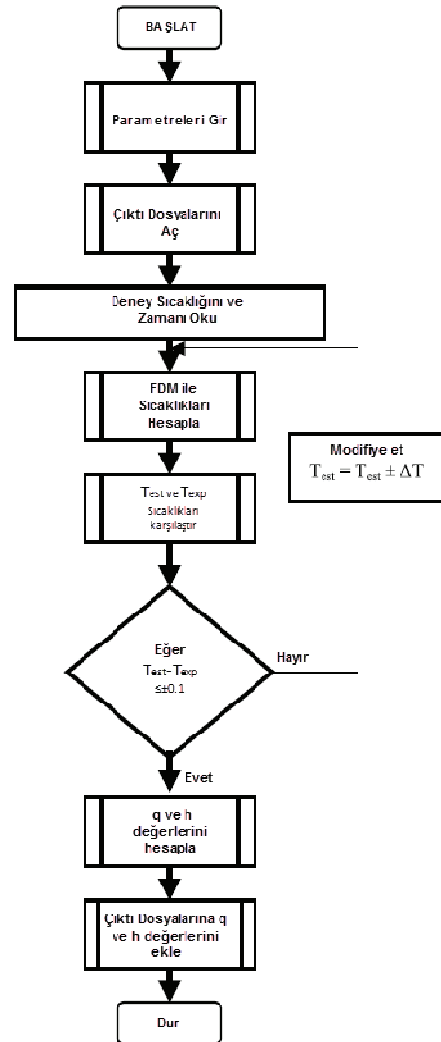
Soğutucu dökümün başlangıcından sonuna kadar TOOL-TEMP TT288 model kalıp şartlandırıcısı ile 323 K, 373 K, 423 K'e ısıtılmıştır. TOOL-TEMP TT288 model kalıp şartlandırıcısı ile 35 litre/dak. debi ile dolaşan MOBILTHERM 32 ısı transfer yağı ile kalıp sıcaklığı belirlenen değerde deney süresince sabit tutulmuştur.

Bu çalışmada döküm alaşımı olarak Çizelge 1'de spektral analiz sonuçları verilen ticari ETIAL-220 döküm alaşımı kullanılmıştır.

Çizelge 1. ETIAL-220 döküm alaşımının kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of ETIAL-220 cast alloy)

| Elementler (Ağırlıkça %) | | | | | |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Al | Si | Fe | Cu | Mg | Zn |
| Gerisi | 0,029 | 0,087 | 4,310 | 0,106 | 0,071 |

ETIAL-220 alaşımı sıcaklık kontrollü elektrik direnç ocağında grafit potanın içinde ergitilmiştir. Ergitme işlemi tamamlandıktan sonra sıvı metalin üzerindeki cüruf temizlenmiştir. 1023 K sıcaklıktaki sıvı metal sıcaklık ölçümüne hazır olan sistemdeki döküm boşluğuna dökülmüş ve soğumaya bırakılmıştır. Katılma sırasında ısıl çiftlerden 0,5 s zaman aralığında elde edilen sıcaklık verileri veri toplama sistemi yardımı ile otomatik olarak kaydedilmiş ve bilgisayara aktarılmıştır. Ölçülen zaman-sıcaklık verileri kullanılarak Şekil 2'de akış şeması verilen Eşitlik 1'deki zamana bağlı ısı iletiminin bir boyutlu genel denkleminin sonlu farklar (explicit) metodu çözümüne göre yazılmış FORTRAN programı yardımı ile döküm ve soğutucu için sıcaklık dağılımları belirlenmiştir.



Şekil 2. FORTRAN programının akış diyagramı (Flowchart of FORTRAN program)

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

Burada k ısı iletim katsayısı (W/mK), c özgül ısınma ısısı (J/kgK) ve ρ yoğunluktur (kg/m³). Hesaplamalarda kullanılan matematik model ile ilgili detaylı bilgi önceki çalışmalarda verilmiştir [8-12].

Herhangi bir zaman aralığında iki düğüm noktası arası mesafe Δx ve sıcaklık farkı yardımı ile Eşitlik 2'deki Fourier ısı iletim denklemi yardımı ile q ısı akısı (W/m²) bulunur.

$$q = k \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x} \quad (2)$$

Daha sonra Eşitlik 3'den döküm parça-kalıp arayüzey ısı transfer katsayısı (h) belirlenir.

$$q = h(T_{DÖKÜM} - T_{KALIP}) \quad (3)$$

Burada h , arayüzey ısı transfer katsayısıdır (W/m²K).

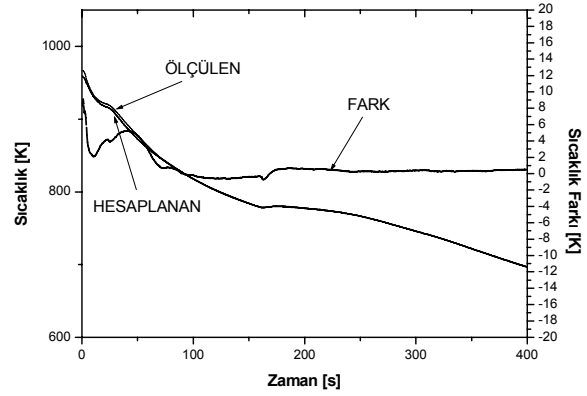
Hesaplamalarda kullanılan döküm alaşımı ve soğutucuların termofiziksel özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir. Soğutucunun dökümle temas eden yüzeyi her döküm işleminden önce 400 grit SiC zımpara kullanılarak temizlenmiş ve soğutucu (kalıp) döküm yapılmadan önce deneyin yapılacağı 323 K, 373 K, 423 K sıcaklıklara ısıtılmıştır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

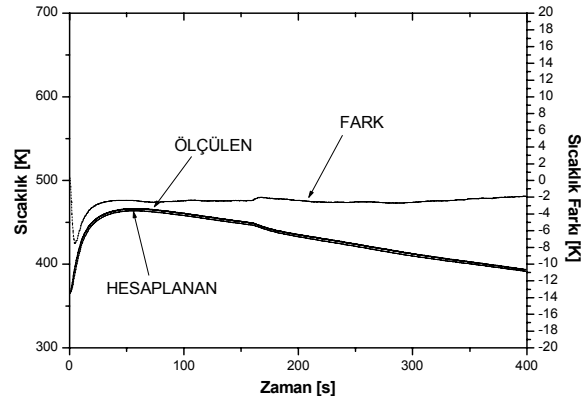
Saf bakır soğutucu kullanarak yapılan dökümlerde döküm parça-soğutucu arayüzeyinden 30 mm (TC5) ve ısı transfer yağı ile 323 K'e ön ısıtılmış bakır soğutucu arayüzeyinden 37.5 mm (TC2) mesafede ölçülen ve sonlu farklar yöntemi ile hesaplanan sıcaklık eğrileri Şekil 3'de verilmiştir. 323 K, 373 K, 423 K sıcaklıktaki bakır soğutucuya karşı dökümden ölçülen ve hesaplanan sıcaklıklar arasındaki fark maksimum 13 K ve saf bakır soğutucu üzerinde arayüzeyden 37.5 mm mesafeden ölçülen ve hesaplanan sıcaklıklar arasındaki fark maksimum 10 K olarak belirlenmiştir.

Griffiths [13] döküm parça-kalıp arayüzey ısı transfer katsayısının belirlenmesinde ölçülen ve hesaplanan sıcaklıklar arasındaki farkın ilk birkaç saniyeden sonra ± 20 K'den az olması kullanılan malzemelerin termofiziksel özelliklerinin doğru seçildiğini ve kalıpta yapılan yalıtımın yeterli olduğunu belirtmiştir. Deneylerin tekrar edilebilirliği kullanılan ısı çiftlerinin

kalibrasyonu, sıcaklık ölçüm aletinin hassasiyeti, her döküm için döküş sıcaklığının, soğutma sıvı debisinin ve döküm yüksekliğinin sabit tutulması gibi parametrelerinin kontrolü ile sağlanabilir [11]. Bu çalışmada sıcaklık farkları Griffiths'in [13] bildirdiği sınırdan daha azdır. Hem döküm parça ve hem de soğutucuların kontrol noktalarında (TC2 ve TC5) ölçülen ve hesaplanan sıcaklıklar arasındaki uyum bu çalışmada kullanılan yalıtım malzemesi, sıcaklık ölçüm sisteminin, malzemelerin termofiziksel özelliklerinin doğru seçildiğini ve aynı zamanda doğru kullanıldığını göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 3. (a) Döküm parça (TC5) ve (b) 323 K sıcaklığa ön ısıtılmış bakır soğutucunun orta noktalarından (TC2) ölçülen, hesaplanan sıcaklıklar ve sıcaklık farkları (Calculated and measured temperatures and the temperature difference between calculation and measurement in the middle of (a) casting (TC5), and (b) the copper chill preheated upto 323 K (TC2))

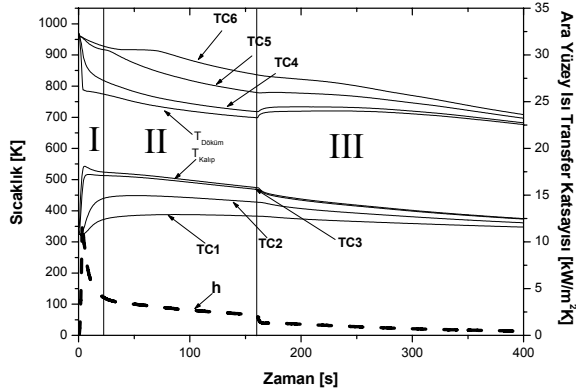
Soğutucu ve döküm parçalarda arayüzeyden TC1, TC2, TC3, TC4, TC5 ve TC6 ölçüm noktalarına denk gelen mesafede ölçülen ve döküm ve soğutucu yüzeylerinde sonlu farklar yöntemi ile hesaplanan

Çizelge 2. Isı transfer katsayısı hesaplamalarında kullanılan termofiziksel özellikler (Thermophysical properties used in the calculation of the heat transfer coefficient)

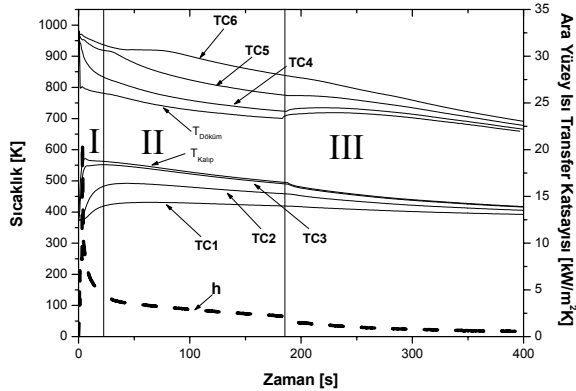
| Malzeme | Özgül Isı Kapasitesi (J/kgK) | | Yoğunluk (kg/m ³) | Isı İletim Katsayısı (W/mK) | Ergime Gizli Isısı (J/kg) |
|-----------|------------------------------|------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| Saf Bakır | 351+1,11*10 ⁻¹ T | | 9095,11-0,46292*T | 416,51-5,874*10 ⁻² T | - |
| ETİAL-220 | Sıvı* | 1070 | 2394 | 160 | 397000 |
| | Kati** | 1070 | 2750 | 220 | |

T Sıcaklık (K), *Ergime Sıcaklığı 917 K**, Katılma Sıcaklığı 845K, Al-Cu alaşım sistemi için ayrışma katsayısı, k: 0.173

$T_{DÖKÜM}$ ve T_{KALIP} sıcaklık verileri ve AITK'ları Şekil 4- Şekil 6'da verilmiştir. Her üç soğutucu ön ısıtma sıcaklıkları için TC1, TC2 ve TC3 numaralı mesafede ölçülen sıcaklıklar başlangıçta çok hızlı artmış ve en yüksek değere ulaştıktan sonra da hava boşluğu oluşumuna kadar düzenli olarak azalmıştır. Arayüzeyde ayrılma meydana geldikten sonra arayüzeyde oluşan hava boşluğu ısı transferini azaltmış ve dolayısı ile yüzey sıcaklıkları ani olarak değişmiştir. Döküm metal yüzeyindeki sıcaklık yükselirken soğutucu yüzeyindeki sıcaklık keskin bir şekilde düşmüştür.



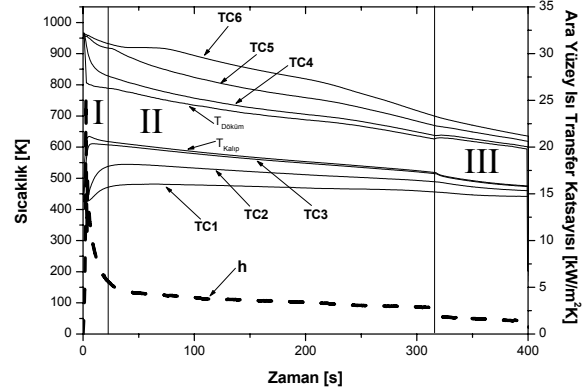
Şekil 4. Döküm parça ve 323 K'e ön ısıtılmış bakır soğutucudan ölçülen ve ara yüzeyde hesaplanan sıcaklık eğrileri ve bu sıcaklıklar yardımı ile hesaplanan ara yüzey ısı transfer katsayısı (Measured and calculated temperatures at the casting and the copper chill preheated upto 323 K, and interfacial heat transfer coefficient calculated with these temperatures)



Şekil 5. Döküm parça ve 373 K'e ön ısıtılmış bakır soğutucudan ölçülen ve ara yüzeyde hesaplanan sıcaklık eğrileri ve bu sıcaklıklar yardımı ile hesaplanan ara yüzey ısı transfer katsayısı (Measured and calculated temperatures at the casting and the copper chill preheated upto 373 K, and interfacial heat transfer coefficient calculated with these temperatures)

Sıcaklık, dökümde 5 mm mesafedeki soğuma eğrisinde (TC4) sürekli azalırken 30 mm (TC5) ve 60 mm mesafelerde (TC6) ergime sıcaklığında bir süre sabit kalmış ve daha sonra sürekli olarak azalmıştır. Bakır soğutucu yüksek iletkenliğe sahip olduğu için katılma sıcaklıkları net olarak görülmemiştir. Sıvı metalin katılmasında TC6 noktasındaki ısıl çiftlerden

ölçülen sıcaklık verilerinden de görüleceği gibi tüm soğutucu ön ısıtma sıcaklıklarında 70-80 s arasında tamamlanmıştır. Şekil 4-Şekil 6'daki zaman-sıcaklık eğrileri incelendiğinde ölçülen sıcaklıklar ile her iki yüzeyde hesaplanan ($T_{DÖKÜM}$ ve T_{KALIP}) sıcaklıkların TC3 ve TC4 sıcaklık eğrileri ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Döküm parça ve 423 K'e ön ısıtılmış bakır soğutucudan ölçülen ve ara yüzeyde hesaplanan sıcaklık eğrileri ve bu sıcaklıklar yardımı ile hesaplanan ara yüzey ısı transfer katsayısı (Measured and calculated temperatures at the casting and the copper chill preheated upto 423 K, and interfacial heat transfer coefficient calculated with these temperatures)

Isıl çiftlerden ölçülen iki nokta arasındaki sıcaklık farkının çok veya az olması malzemenin ısı iletim katsayısına bağlıdır. Akar [10] yaptığı doktora çalışmasında soğutucu saf bakırın ötektik Al-Si alaşımına göre daha yüksek ısı iletim katsayısına sahip olmasından dolayı döküm metalindeki sıcaklık farkları soğutucudaki sıcaklık farkından daha fazla gerçekleştiğini bildirmiştir. Bu çalışmada soğutucu ve %4.3 Cu içeren ETIAL 220 alaşımından ölçülen sıcaklıklar arasındaki fark çok bariz değildir. Bunun iki nedeni vardır; birincisi ölçüm yapılan noktalar arasındaki fark daha azdır. Diğer bir neden ise Al-4.3Cu alaşımın ısıl iletimi yaklaşık 220 W/mK (Çizelge 2) iken Al-%5Si alaşımı için bu değer yaklaşık 100 W/mK dir [11]. Dolayısı ile Al-Cu alaşımı daha hızlı ısı iletebilme kabiliyetine sahiptir.

Sıvı metal kalıba döküldükten sonra soğutucu sıcaklıkları hızlı bir şekilde artmıştır. Soğutucunun 5 mm mesafesindeki sıcaklık (TC1) artışının birkaç saniyede gerçekleşmesi bakır soğutucunun ısıyı hızlı ilettiğini göstermektedir. ETIAL-220 döküm alaşımında arayüzeyden 5 mm mesafedeki sıcaklık eğrisinde (TC4) herhangi bir yatay seyir görülmemektedir. 37.5 mm mesafede (TC5) kısa süreli yatay seyir ve 75 mm mesafede (TC6) biraz daha uzun süreli yatay seyir görülmüştür.

Bütün deneylerden elde edilen ısı transfer katsayıları benzer karakteristiğe sahiptir. Isı transfer katsayıları başlangıçta düşük bir değerden en yüksek değere yükselmiş ve daha sonra yaklaşık 25. s'ye kadar kademeli olarak düşmüştür.

Isı transfer katsayısı değerleri yaklaşık 25. s sonrasında arayüzeyden ayrılma (hava boşluğu oluşumu) gerçekleşinceye kadar çok yavaş azalmıştır. Hava boşluğu oluşumundan sonra ani bir düşüş meydana gelmiştir. Daha sonra yine zamanla çok yavaş olarak düşmeye devam etmiştir.

50 °C, 100 °C ve 150 °C soğutucu sıcaklıkları için maksimum ısı akısı değerleri sırası ile 37 000 kW/m², 40 000 kW/m² ve 45 000 kW/m² ve maksimum AITK'ları ise 12 000 W/m²K, 20 000 W/m²K ve 25 000 W/m²K olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4-Şekil 6'da verilen ısı transfer katsayıları dökümün başlangıcından 300. s'ye kadar ortalama değerleri hesaplanmış ve bu değerler Çizelge 3'de verilmiştir. Ortalama ısı transfer katsayıları 323 K soğutucu sıcaklığında 3202 W/m²K, 373 K soğutucu sıcaklığında 3763 W/m²K ve 423 K soğutucu sıcaklığında ise 4691 W/m²K olarak hesaplanmıştır. Bakır soğutucu başlangıç sıcaklığı arttıkça ortalama AITK artmıştır.

Çizelge 3. Şekil 4-Şekil 6'da verilen ara yüzey ısı transfer katsayılarının ortalama (\bar{h}) değerleri (The average values (\bar{h}) of interfacial heat transfer coefficients given Figure 4-Figure 6)

| Soğutucu Sıcaklığı (K) | \bar{h} (W/m ² K) |
|---------------------------|-----------------------------------|
| 323 | 3202 |
| 373 | 3763 |
| 723 | 4691 |

Isı transferi için önemli parametrelerden birisi de kalıp sıcaklığıdır. Metalik kalıplarda sürekli döküm yapıldığı için kalıp ısınır. Ayrıca metalik kalıplar döküm yapılmadan önce ön ısıtmaya tabi tutulur.

Elde edilen veriler AITK'larının bakır soğutucunun ön ısıtma sıcaklığının artması ile arttığını göstermiştir. Literatürde kalıbın başlangıç sıcaklığının arayüzey ısı transferi ve ısı akısı üzerine etkisini çalışan çok az araştırmacı vardır [3-7,14].

Şekil 4-Şekil 6'da verilen bakır soğutucu Al-Cu (ETIAL-220) döküm AITK eğrileri karakteristik olarak benzerlik gösterdiği ve üç bölgeden oluştuğu görülmektedir.

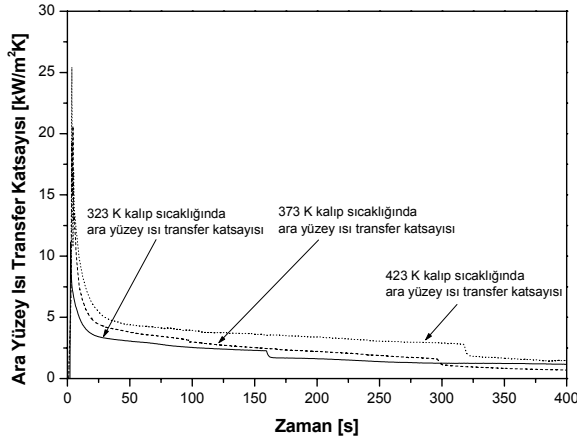
I. Bölge: Literatürde bakır soğutucu ve saf alüminyum ile yapılan hızlı katılaştırma deneylerinde sıvı durumda AITK'nın 80 000-100 000 W/m²K aralığında olduğunu bildirilmiştir [15]. Soğutucu ön ısıtma sıcaklığı 323 K, 373 K, 423 K durumlarında AITK çok düşük bir değerden başlayarak 2-3 s gibi çok kısa bir sürede maksimum değere ulaşmıştır. Elde edilen maksimum AITK değerleri 323 K, 373 K, 423 K ön ısıtma sıcaklıkları için sırası ile 12 000 W/m²K, 20 000 W/m²K ve 25 000 W/m²K olarak

hesaplanmıştır. Yapılan literatür araştırmasında dökümden sonraki kısa zaman aralığında döküm yüzeyinin katılaşmasından dolayı sıvı durumda AITK karakteristiğinin belirlenimin çok zor olduğu bildirmiş ve ayrıca ani döküm şartlarından kaynaklanan başlangıçtaki muhtemel hatalı sıcaklık ölçüm olasılığına dikkat çekmişlerdir [16,17]. Bölge 1'deki en yüksek AITK değerine kadar olan zaman aralığındaki ısı transfer katsayısı ihmal edilmiştir.

Sıvı metal kalıbı doldurduktan sonra kalıba temas eden alanlarda pre-dentrit olarak adlandırılan çekirdekler oluşur. Bu durum, Akar [10] ve Kayıkcı'nın [18] doktora çalışmalarında açıkça tespit edilmiştir. Sıvı metal kalıp yüzeyinde çekirdeklendikten sonra ince bir katı kabuk oluşur. Arayüzeyin üzerindeki sıvı metal oluşan katı kabuğa hidrostatik baskı yapar. Bakır soğutucunun yüksek ısı iletkenliğinden dolayı I. Bölge yaklaşık 20-30 saniye sürmüştür. Döküm yüzeyinde oluşan katı kabuk katılaşmanın devam etmesiyle kalınlaşır ve arayüzeye gelen hidrostatik basınç etkisi azalır. I. bölgedeki AITK soğutucu yüzeyini sıvı metalin ıslatabilme kabiliyeti, döküm sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü, kalıp sıcaklığı, soğutucunun ısıl iletkenliği, sıvı metalin çalkalanması ve hidrostatik basınç gibi birçok parametreden etkilenir.

II. Bölge: Soğutucu üzerinde yeterli katı metal kabuk oluştuğundan sonra katılaştıran metalin çekmesinden dolayı metal ve soğutucu arasında uyumlu temas sona erer ve II. bölge başlar. Isı transfer katsayısı katılaşma süresince yaklaşık olarak sabit değerde devam etmiştir. Bu durum katılaştıran metalin çekme etkisi soğutucunun genleşme etkisi tarafından dengelenmesinden kaynaklanmış olabilir [8]. II. bölgenin bitiş zamanı kalıp sıcaklığının artması ile gecikmiştir. Bu bölgede AITK üzerinde döküm parça-soğutucu arayüzey uyumluluğu, katılaşma yönü, soğutucunun ısı iletim katsayısı ve yüzey pürüzlülüğü, döküm parça yüksekliği/hacmi ve basınç etkili olan önemli parametrelerdir [10,11].

III. Bölge: 323 K, 373 K, 423 K'e ön ısıtma yapılmış bakır soğutucular için III. bölge başlama zamanı sırası ile 160.s, 180. s ve 310. s olarak belirlenmiştir. Şekil 4-Şekil 6'dan da açıkça görüleceği gibi III. bölge başlangıcında döküm parça-soğutucu arayüzeyinde hava boşluğu oluşumu meydana gelmiş ve soğutucu yüzeyi ve döküm metali yüzeyi birbirinden ayrılmıştır. Dolayısı ile çok az bir alandan iletim ile ısı transferi gerçekleştiği için ölçülen sıcaklıklar ani olarak değişmiştir. Soğutucudan ölçülen sıcaklıklar keskin bir şekilde azalmış buna karşın arayüzeyden ısı transferi az olduğu için döküm metalinin sıcaklıklarında ani bir artış meydana gelmiştir.



Şekil 7. Soğutucu ön ısıtma sıcaklığının ara yüzey ısı transfer katsayısına etkisi (The effect of preheating chill temperature on the interfacial heat transfer coefficient)

Kalıp ön ısıtma sıcaklığının AITK'na etkisi Şekil 7 ve Çizelge 3'de verilmiştir. Şekil 7 ve Çizelge 3 incelendiğinde kalıp ön ısıtma sıcaklığı arttıkça AITK'nın arttığı ancak bu artışın doğrusal olmadığı açıkça görülmektedir. Ön ısıtma sıcaklığı 323 K'den 373 K'e yükseltildiğinde AITK'nda 560 W/m²K'lik bir artış görülürken 373 K'den 423 K'e yükseltildiğinde bu artış yaklaşık 930 W/m²K'dir. Bouchard ve arkadaşları [6] kalıp sıcaklığının artması ile sıvı metalin kalıbı ıslatmasının arttığını ve dolayısı ile ısı transferinin de arttığını bildirmişlerdir. Sıvı metalin arayüzeyde iyi bir temas sağlaması arayüzeyde daha çok döküm metali alanının kalıp yüzeyi ile temasını sağlar. Bu da daha çok ısının arayüzeyden daha kısa sürede dökümden kalıba geçmesini sağlar. Holman [19] birbirine temas eden iki yüzey arasında gerçek temas alanı arttıkça ısı transferinin arttığını bildirmiştir.

Şekil 7'de kalıp ön ısıtma sıcaklığının artması ile arayüzeyde hava boşluğunun (III. bölge başlangıcı) daha geç oluştuğu görülmektedir. Bunun sebebinin kalıp sıcaklığının artması ile yüzey sıcaklıkları arasındaki farkın azalması sonucu arayüzeyde katılacak metalin daha uzun süre hidrostatik basıncı yenememesinden ve yüksek sıcaklıklarda kalıp gelişmesinin daha fazla olmasından meydana geldiği düşünülmektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Kalıp sıcaklığına göre döküm parça-kalıp arayüzey ısı transfer katsayılarının belirlenmesi çalışmalarında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Saf bakır soğutucuya karşı dökümden ölçülen ve hesaplanan sıcaklıklar arasındaki fark maksimum 13 K olarak tespit edilmiştir. 323 K, 373 K, 423 K sıcaklıktaki saf bakır soğutucu üzerinde ara yüzeyden 37,5 mm mesafeden ölçülen ve hesaplanan sıcaklıkların arasındaki fark maksimum 10 K olarak belirlenmiştir.

2. Ortalama ısı transfer katsayıları 323 K soğutucu sıcaklığında 3202 W/m²K, 373 K soğutucu sıcaklığında 3763 W/m²K ve 423 K soğutucu sıcaklığında ise 4691 W/m²K olarak hesaplanmıştır. Ön ısıtma sıcaklığı 323 K'den 373 K'e yükseltildiğinde ara yüzey ısı transfer katsayısında 560 W/m²K'lik bir artış görülürken 373 K'den 423 K'e yükseltildiğinde bu artış yaklaşık 930 W/m²K'dir. Kalıp (soğutucu) başlangıç sıcaklığı arttıkça ortalama ara yüzey ısı transfer katsayısı artmıştır.

3. Maksimum ara yüzey ısı transfer katsayısı değerleri 323 K, 373 K, 423 K ön ısıtma sıcaklıkları için sırası ile 12 000 W/m²K, 20 000 W/m²K ve 25 000 W/m²K olarak hesaplanmıştır. Elde edilen veriler ara yüzey ısı transfer katsayılarının bakır soğutucunun ön ısıtma sıcaklığının artması ile arttığını göstermiştir.

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

| | |
|-------------|--|
| q | : Isı akısı, W/m ² |
| h | : Arayüzey ısı transfer katsayısı, W/m ² K |
| \bar{h} | : Ortalama arayüzey ısı transfer katsayısı, W/m ² K |
| $T_{DÖKÜM}$ | : Döküm metal yüzey sıcaklığı, K |
| T_{KALIP} | : Soğutucu metal yüzey sıcaklığı, K |
| T | : Sıcaklık, K |
| t | : Zaman, s |
| x | : Mesafe, m |
| k | : Isı iletim katsayısı, W/mK |
| c | : Özgül ısınma ısısı, J/kgK |
| ρ | : Yoğunluk, kg/m ³ |
| Δx | : Mesafe aralığı |
| i | : Düğüm noktası |
| AITK | : Arayüzey ısı transfer katsayısı |

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmaya 07/2009-10 numaralı Bilimsel Araştırma Projesi çerçevesinde maddi destek sağlayan Gazi Üniversitesi Rektörlüğüne ve Çukurova Kimya Endüstrisi A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Vijayaraj T.R., Sulaiman S., Hamouda A.M.S., "Numerical simulation of casting solidification in permanent metallic molds", *Journal of Materials Processing Technology*, 178: 29-33, 2006.
2. Zhang B., Maijer D.M. and Cockcroft S.L., "Development of a 3-D thermal model of the low-pressure die-cast (LPDC) process of A356 aluminum alloy wheels." *Materials Science and Engineering A*, 464: 295-305, 2007.
3. Srinivasan, M.N., "Heat transfer coefficients at the casting-mould interface during solidification of flake graphite cast iron in metallic moulds",

- Indian Journal of Technology*, 20(4): 123-129, 1982.
4. Michel, F., Louchez, P. R., Samuel, F. H., "Heat transfer coefficient during solidification of Al-Si alloys: Effects of mold temperature, coating type and thickness", *AFS Transactions*, 103: 275-283, 1995.
 5. Hallam, C.P., Griffiths, W.D., "A Model of the Interfacial Heat-Transfer Coefficient for the Aluminum Gravity Die-Casting Process", *Metallurgical and Materials Transactions B*; 35 (4): 721-733, 2004.
 6. Bouchard, D., Leboeuf, S., Nadeau, J.P., Guthrie, I.L.R., Mihaela, I., "Dynamic wetting and heat transfer at the initiation of aluminum solidification on copper substrates", *Journal of Materials Science*, 44: 1923-1933, 2009.
 7. Gozlan, E., Bamberger, M., "Heat flow and solidification in a metal mould source", *Zeitschrift für Metallkunde*, 78(9): 677-682, 1987.
 8. Şahin, H.M., Kocatepe, K., Kayıkcı R., Akar, N., "Determination of Unidirectional Heat Transfer Coefficient during Unsteady State Solidification at Metal Chill Interface", *Energy Conversion and Management*, 47:19-34, 2006.
 9. Şahin, H.M., Kocatepe, K., Kayıkcı R., Akar, N., "The effect of surface roughness of chill on the interfacial heat transfer coefficient in eutectic Al-Si casting", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 21 (3): 473-481, 2006.
 10. Akar, N., "Katılaşma sırasında döküm-kalıp arayüzeyinde ısı transfer katsayısının incelenmesi", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 3-120, 2006.
 11. Akar, N ve Yalçın, N., "Effect of silicon content in Al-Si alloys on heat transfer coefficient at casting-mold interface", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 22 (3): 451-459, 2007.
 12. Akar, N, Şahin H.M., Yalçın, N., Kocatepe K., "Experimental study on the effect of liquid metal superheat and casting height on interfacial heat transfer coefficient", *Experimental Heat Transfer*, 21:83-98, 2008.
 13. Griffiths, W.D., "Heat-Transfer Coefficient during the Unidirectional Solidification of an Al-Si Alloy Casting", *Metallurgical and Materials Transactions B*, 30: 473-482, 1999.
 14. Hallam, C.P., Griffiths, W.D, Butler, N.D., "Interfacial heat transfer between a solidifying aluminum alloy and a coated die steel", *Materials Science Forums*, 329-330: 467-472, 2000.
 15. Wang, G.-X., Matthys, E.F., "Experimental determination of the interfacial heat transfer during cooling and solidification of molten metal droplets impacting on a metallic substrate: effect of roughness and superheat", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45: 4967-4981, 2002.
 16. Lee, Z.H., Kim, T.G., Choi, Y.S., "The Movement of the Concave Casting Surface during Mushy-Type Solidification and Its Effect on the Heat-Transfer Coefficient", *Metallurgical and Materials Transactions B*, 29: 1051-1056, 1998.
 17. Kim, H-S., Cho, I-S., Shin, J-S.; Lee, S-M., Moon, B-M. "Solidification parameters dependent on interfacial heat transfer coefficient between aluminium casting and copper mould", *ISIJ International*, 45(2): 192-198, 2005.
 18. Kayıkcı, R., "Metal-Mold Contact and Heat Transfer during Casting Solidification", PhD, *Manchester Materials Science Centre, University of Manchester and UMIST*, Manchester, 77-181, 1999.
 19. Holman, J.P., "Heat Transfer 8th Edition", *McGraw-Hill*, New York, 15-100, 1997