

Al-Si ALAŞIMLARINDA SİLİSYUM MİKTARININ DÖKÜM PARÇA-KALIP ARAYÜZEY ISI TRANSFER KATSAYISI ÜZERİNE ETKİSİ

Neşet AKAR ve Necati YALÇIN

Metal Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Beşevler, Ankara
nakar@gazi.edu.tr, nevalcin@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 25.08.2006; Kabul/Accepted: 12.12.2006)

ÖZET

Bu çalışmanın amacı katılma süresince su soğutmalı bakır soğutucu üzerinde tek yönlü dikey olarak katılma Al-Si alaşımlarında silisyum içeriğinin arayüzey ısı transferi katsayısına etkisini incelemektir. Arayüzey ısı transfer katsayısı silisyum içeriğine bağlı olarak, Sonlu Farklar Metoduna dayalı FORTRAN programı ile belirlenmiştir. Sonuç olarak; arayüzey ısı transfer katsayısı silisyum içeriğinin azalması ile artmıştır, maksimum arayüzey ısı transfer katsayısı değerleri; %7Si'de 8900 W/m²K, %5Si'de 14600 W/m²K ve %3Si'de 19100 W/m²K olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Döküm-kalıp arayüzeyi, Al-Si alaşımları, ısı transfer katsayısı, sonlu farklar metodu.

EFFECT OF SILICON CONTENT IN Al-Si ALLOYS ON HEAT TRANSFER COEFFICIENT AT CASTING-MOLD INTERFACE

ABSTRACT

The objective of the present work was to investigate the effect of silicon content on the interfacial heat transfer coefficient (IHTC) for vertically upward unidirectional solidification of Al-Si casting on water cooled copper chills during solidification. The interfacial heat transfer coefficient measured as a function of different silicon content was determined by using finite difference method solving FORTRAN language. The obtained results; the heat transfer coefficients increases as silicon content decreases, the maximum heat transfer coefficient values were obtained; 8900 W/m²K with %7, 14600 W/m²K with %5 and 19100 W/m²K with %3 silicon content.

Keywords: Casting-mold interface, Al-Si alloys, heat transfer coefficient, finite difference method.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Döküm yöntemlerinde döküm-kalıp ara yüzeyindeki ısı transferi katılma oranını ve buna bağlı olarak da döküm parça yapısını ve mekanik özelliklerini kontrol eden en önemli faktörlerden birisidir. Dolayısı ile sıvı metalin kalıba döküldükten sonra katılma sürecinde meydana gelen ısı transferinin doğru olarak belirlenmesi döküm parçasının kalitesi açısından son derece önemlidir. Günümüzde birçok dökümhanede dökümlerin üretim tasarımı bilgisayar ortamında yapılarak hata oranı en aza indirilmeye çalışılmaktadır. Dökümlerin bilgisayar ortamında tasarımı ise doğrudan dökümlerin katılma hızı, sıcaklık gradyanı, ısının döküm-kalıp ara yüzeyinden transfer hızı, kalıp malzemesinin ısı özellikleri gibi

parametrelerin doğru bilinmesine ve uygun şartların belirlenerek kullanılmasına bağlıdır. 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 çok yoğun olarak araştırmalar devam etmektedir.

Döküm/kalıp ara yüzeyindeki ara yüzey ısı transferi katsayısı alaşım tipi, katılma çekmesi, sıvı metalin yüzey gerilimi, döküm sıcaklığı, döküm yüksekliği, kalıp sıcaklığı, kalıp malzemesi, kalıp kalınlığı, kalıp kaplaması, uygulanan basınç, katılma yönü, döküm/kalıp ara yüzeyinde meydana gelen hava boşluğu ve katılma metal ile temas eden kalıbın yüzey pürüzlülüğü gibi pek çok değişkenden

etkilenmektedir [1–29]. Birçok araştırmacı tarafından çeşitli metal-kalıp sistemlerinde döküm-kalıp ara yüzeyinde oluşan hava boşluğu ölçülerek ara yüzey ısı transfer katsayıları hesaplanmıştır [8, 19, 30–38]. Bu teknik basit olmasına karşın boyutsal değişimi ölçen problemlerin tam ara yüzeye yerleştirilememesi, döküm metalinin katılaşmasına kadar döküm parça içindeki probun hareket etmemesi, ara yüzeyde tam ayrılma gerçekleşmemesi gibi nedenlerden dolayı bu yöntemin doğru sonuçlar vermeyebileceği bildirilmiştir [37]. Son yıllarda döküm/kalıp ara yüzeylerinde ısı transfer katsayıları ölçümleri sıvı metalin tek yönlü kalıpta soğutulmuş katılaşırılması ile elde edilen zaman-sıcaklık verileri ile yapılmaktadır. Deneysel dökümlerde döküm alaşımı ve kalıp malzemeleri genellikle alüminyum, çinko, kurşun, kalay, bakır, dökme demir ve çelik gibi termo-fiziksel özellikleri iyi bilinen metal ve alaşımları kullanılmaktadır [1, 5, 9–12, 23, 39]. Öte yandan, kum kalıplarda ısı transferi, kumun tipi, kumun tane boyutu, şekli ve dağılımı, bağlayıcı tipi ve oranı, kum kalıbın yoğunluğu, nem oranı ve kalıba dökülen metalin sıcaklığı, kum karışımının termo-fiziksel özellikleri gibi birçok parametreden etkilenir. Kumun iyi bir iletken olmaması döküm/kalıp ara yüzeyinde oluşan ısıl direncin önemini ortadan kaldırdığından bu kalıplarda soğuma modelleri ara yüzey ısı transfer katsayılarını dikkate almazlar [39–43]. Ara yüzey ısı transfer değerleri alaşımı oluşturan malzemelerin cinsine ve bileşimine göre değişim göstermektedir ve literatürde Al alaşımlarının ısı transferi katsayıları 250 ile 30000 W/m²K aralığında görülmektedir [17–19].

Al-Si alaşımları döküm yöntemi ile yaygın olarak şekillendirilmektedir. Alüminyuma silisyum ilavesi döküm karakteristiğini geliştirdiği gibi mekanik özellikler ve korozyon dayanımını da iyileştirir. Genel olarak kum, hassas döküm gibi yavaş katılaşma şartları sağlayan döküm yöntemlerinde %5–7, kokil dökümlerde %7–9 ve basınçlı dökümlerde %8–12 silisyum oranları kullanılmaktadır [12]. Yapılan araştırmalarda Taha ve arkadaşları [8] Al-Si alaşımlarının dökümünde ara yüzey ısı transfer katsayısının alaşıma giren Si miktarındaki artışına bağlı olarak artış gösterdiğini belirtirken diğer araştırmacılar [12, 17] ise azaldığını açıklamışlardır. Bu çalışmada Al-Si alaşımlarında alaşımın içindeki Si içeriğinin ara yüzey ısı transferi ve ısı transfer katsayısına etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Bunun için Al-Si alaşımları su soğutmalı bakır soğutucu üzerinde tek yönlü katılaşmıştır. Değişik silisyum oranlarının alaşımın katılaşma süresince zamanın bir fonksiyonu olarak döküm/metal kalıp ara yüzeyinde ara yüzey ısı transfer katsayı ve ısı akıları üzerine etkisi incelenmiştir.

2. MALZEME VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

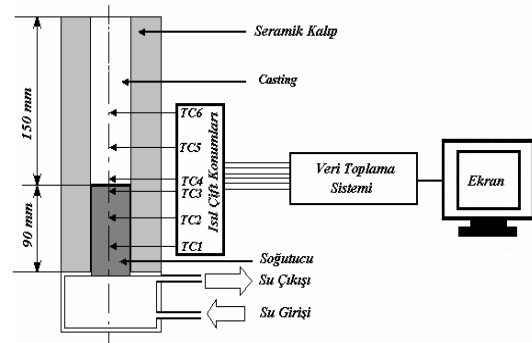
2.1. Deneylerin Yapılışı ve Deneysel Düzenegi (Experimental Procedure and Set-up)

Veri toplama ve analiz sistemine bağlı deneylerin yapıldığı düzenek Şekil 1’de şematik olarak gösterilmiştir. Tek yönlü katılaşma sağlanan bu düzenekte 28 mm iç çapında ve 150 mm boyunda ısı iletkenliği oldukça düşük (0,12 W/mK) olan alümina-silikat seramik kalıba ve 28 mm çapında ve 90 mm boyunda 20 litre/dakika su ile soğutulan silindirik bakır soğutucuya altı adet kalibrasyonları yapılmış K tipi ısıl çiftler döküm-soğutucu ara yüzeyinden 5 mm (TC3, TC4), 37,5 mm (TC2, TC5) ve 75 mm (TC1, TC6) uzaklıkta simetrik olarak yerleştirilmiştir. Isıl çiftler, K tipi ısıl çift için özel taşıma kablosu ile veri toplama sistemine bağlanmıştır. Kaplamasız soğutucu yüzeyi her deneyden önce 400 grit zımpara ile temizlenmiştir.

Özellikleri çok iyi bilinen bakır soğutucu ve döküm malzemelerin (Al-Si alaşımları) termofiziksel özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Bu deneysel çalışmada ETİAL 140 (ötektik Al-Si) ile ETİAL 8 (ticari saflıkta Al) alaşımları kullanılarak Al-%3 Si, Al-%5 Si ve Al-%7 Si alaşımları elde edilmiştir.

Tek yönlü katılaşma düzenegi ısının yalnız alttan ve su soğutmalı soğutucu tarafından uzaklaştırılacak şekilde tasarlanmış ve katılaşmanın döküm/soğutucu ara yüzeyden başlayarak yukarıya doğru devam etmesi sağlanmıştır.

Ergitme işlemi direnç telli ergitme ocağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her alaşım ergitme sıcaklığının 150 K üzerinde döküm sıcaklığında (Al-%3 Si 1067 K, Al-%5 Si 1055 K ve Al-%7 Si 1033 K) oda sıcaklığına sahip kalıba dökülmüş ve soğumaya bırakılmıştır. Katılaşma sırasında ısıl çiftlerden 0,5 s zaman aralığında elde edilen sıcaklık verileri otomatik olarak kaydedilmiş ve bilgisayara aktarılmıştır. Ölçülen zaman-sıcaklık verileri Sonlu Fark Yöntemi kullanılarak döküm ve soğutucu için sıcaklık dağılımlarının belirlenmesinde kullanılmıştır.



Şekil 1. Deneysel düzeneginin şematik gösterimi (Schematic representation of the experimental setup)

Tablo 1. Isı transfer katsayılarının hesaplanmasında kullanılan termofiziksel özellikler. (Thermophysical properties used in the calculation of the heat transfer coefficient.) [12, 23].

Özellikler	Sembol/Birim	Al-3% Si	Al-5% Si	Al-7% Si	Bakır
Isı İletim Katsayısı	k_S (W/m K) (Katı)	121	104	90	416.51-0,05874•T
	k_L (W/m K) (Sıvı)	91	90	88,6	
Özgül Isı	c_S (J/kg K) (Katı)	963	963	963	351+0,11069•T
	c_L (J/kg K) (Sıvı)	1084	1082	1080	
Yoğunluk	ρ_S (kg/m ³) (Katı)	2695	2690	2680	9095,11-0,46292•T
	ρ_L (kg/m ³) (Sıvı)	2385	2389	2394	
Ergime Gizli Isısı	L (J/kg)	389187	393083	397440	
Ergime Sıcaklığı	T_S (°C)	917	905	883	
Ötektik Sıcaklığı	$T_{ÖTK}$ (°C)	850	850	850	
Katılaşma Sıcaklığı	T_L (°C)	849	849	849	
Ayrışma Katsayısı	K_O	0,13	0,13	0,13	

Sıcaklık (T) Kelvin'dir.

2.2. Döküm-Kalıp Ara Yüzey Isı Transfer

Katsayısının Belirlenmesi (Determination of Casting-Mold Interfacial Heat Transfer Coefficient)

Isı transferinin belirlenmesi döküm ve soğutucu içindeki sıcaklık dağılımına bağlıdır. Sıcaklık dağılımı gerçek uygulamalarda üç boyutlu ve geometriye bağlı olarak düzlemsel, silindirik ve küresel koordinatlar şeklindedir. Fakat problemin sadeleşmesi ve çözüm kolaylığı açısından tek yönlü katılaşma şartlarında tek boyutlu düzlemsel geometride sıcaklık dağılımları kullanılarak aşağıdaki şekilde ısı transferi belirlenmiştir.

Döküm-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayısı, h (W/m²K),

$$h = \frac{q}{(T_D - T_K)} \quad (1)$$

eşitliği ile belirlenir. q birim zamanda birim yüzeyden geçen ısı akısı (W/m²), T_D ve T_K sırasıyla döküm ve soğutucu yüzey sıcaklıklarıdır (K). Ancak burada q , T_D ve T_K değerleri başlangıçta bilinmemektedir. Fourier ısı iletim denklemi (Eşitlik 2) yardımıyla katı ve ergiyik malzeme içindeki ısı akısı bulunabilir.

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

Burada k malzemenin ısı iletim katsayısıdır (W/mK). $\partial T/\partial x$ sıcaklık gradyanti sayısal yöntemlerle bulunur.

Katı ve ergiyik malzeme içerisinde zamana bağlı ısı iletim denklemi sonlu farklar metodu ile çözülerek belirlenen aralık ve yüzeylerdeki sıcaklık değerleri bulunur. Eşitlik (2)'de sıcaklıklar yerine konularak q değeri elde edilir. Daha sonra Eşitlik (1)'de yüzey sıcaklıkları (T_D ve T_K) ve q değerleri yerine konularak ara yüzeydeki ısı transfer katsayısı belirlenir.

2.3. Zamana Bağlı Isı İletiminin Sonlu Farklar

(Explicit) Metodu ile Çözümü (Solution of Time Dependent Heat Conduction by Using Finite Difference (Explicit) Method)

Katı ve ergiyik malzeme içerisindeki ısı iletiminin zamana bağlı bir boyutlu genel denklemi;

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3)$$

Bu eşitlikte ρ , c ve k sırası ile malzemenin yoğunluğu (kg/m³), özgül ısı (J/kgK) ve ısı iletim katsayısıdır (W/mK). T sıcaklık (K), t zaman (s) ve x uzunluktur (m).

Döküm alaşımında katılaşma sırasında faz değişiminden kaynaklanan bir ısı üretimi olacaktır. Bu dururumda eşitlik (3)'te verilen ısı iletim denklemi

$$\rho c \frac{dT}{dt} = k \frac{d^2T}{dx^2} + \dot{q} \quad (4)$$

halini alır. Eşitliğin sağ tarafındaki \dot{q} katılaşma sırasında katılaşan metalin ergime gizli ısını bırakmasından kaynaklanan birim zamanda birim hacimde ısı üretimi terimidir (W/m³) ve aşağıdaki eşitlik (5) ile hesaplanır.

$$q = \rho L \frac{df_s}{dt} \quad (5)$$

Burada L ergime gizli ısı (J/kg) ve f_s katılaşma sırasındaki katı oranıdır.

Ötektik altı Al-Si alaşımlarında katılaşma önce birincil alüminyum α fazı daha sonra ise ötektik faz olmak üzere iki aşamada meydana gelir. Sıvı fazdan katı faza geçişte yarı katı bölgenin nümerik modellenmesi yapılırken ısı üretiminin de iki bölgeden oluşması gerekir.

Hızlı katılma şartlarında α fazında katı oranı aşağıda verilen Scheil eşitliği ile belirlenir.

$$f_s = 1 - \left(\frac{T_{AL} - T}{T_{AL} - T_L} \right)^{1/(K_0-1)} \quad (6)$$

Burada K_0 ayrışma katsayısı, T_{AL} saf alüminyumun ergime sıcaklığı (K), T_L alaşımın ergime sıcaklığıdır (K).

Ötektik katılma ise katı oranı

$$f_s = \left(\frac{T_{ÖTK} - T}{T_{ÖTK} - T_S} \right) \quad (7)$$

eşitliği ile belirlenir. Eşitlik (5)'teki df_s/dt terimi sıcaklıkla ilişkilendirilerek Eşitlik (4)'te yerine konulursa denklem

$$\rho c \frac{dT}{dt} = k \frac{d^2T}{dx^2} + \rho L \frac{df_s}{dT} \frac{dT}{dt} \quad (8)$$

şekline gelir. Terimler düzenlendiğinde eşitlik

$$\rho(c - L \frac{df_s}{dT}) \frac{dT}{dt} = k \frac{d^2T}{dx^2} \quad (9)$$

elde edilir. Burada: $c' = c - Ldf_s/dT$ katılma esnasındaki özgül ısıdır (J/kgK).

$$\rho c' \frac{dT}{dt} = k \frac{d^2T}{dx^2} \quad (10)$$

Yarı-katı fazın özgül ısı

$$c = (1 - f_s)c_L + f_s c_S \quad (11)$$

eşitliği ile elde edilebilir. Burada alt indisler L ve S sırasıyla sıvı ve katı fazı temsil etmektedir.

Yarı katı bölgede ısı iletim katsayısı ve yoğunluk gibi özellikler özgül ısı hesabına benzer şekilde aşağıdaki eşitliklerle belirlenmiştir.

$$k = (1 - f_s)k_L + f_s k_S \quad (12)$$

$$\rho = (1 - f_s)\rho_L + f_s \rho_S \quad (13)$$

Eşitlik (3) ve Eşitlik (10)'un Sonlu Farklar Metodu ile çözümü

$$T^{p+1}_{(m)} = T^p_{(m)}(1 - 2Fo) + Fd(T^p_{(m+1)} + T^p_{(m-1)}) \quad (14)$$

ifadesi ile verilir. Bu eşitliğin bulunması daha önceki çalışmalarda [1,2] ayrıntılı olarak verilmiştir. Eşitlikte üst indis p , T 'nin zamana bağlılığını göstermektedir ve zaman türevi hesaplanan $(p+1)$ ve hesaplanandan bir önceki (p) zamana ait sıcaklıkların farkı ile ilişkilidir. Eşitlik (14)'deki $Fo = [(k/\rho c)\Delta t]/\Delta x^2$ terimi Fourier sayısıdır. Eşitlik (14) ile verilen yöntem explicit yaklaşımı olarak isimlendirilir [46,47]. Eşitlik (14)'de bir boyutlu geometride iç düğüm noktası için, $(1 - 2Fo) \geq 0$ olması şarttır. Başka bir deyişle,

$$Fo \leq \frac{1}{2} \quad (15)$$

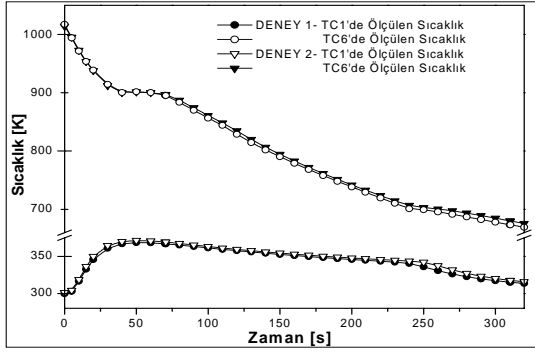
olması gerekmektedir. Bu kıstas, Δx ve α 'nın verilen değerleri için Δt 'nin alabileceği en büyük değeri bulmakta kullanılabilir.

2.4. Sınır Şartları (Boundary Conditions)

Başlangıç sınır şartı olarak TC1 ve TC6 ısı çiftlerinden ölçülen ilk değerleri bütün bilinmeyen sıcaklık noktalarına vererek çözüme başlanır. Daha sonra her zaman aralığı için TC1 ve TC6'dan alınan değerlerin yardımıyla bilinmeyen diğer noktalar bulunur. Burada gerekli olan ikinci sınır şartı ise ara yüzeyden 5 mm uzaklıktaki TC3 ve TC4 değerleri alınarak, Beck Metodu [44] yardımıyla bir önceki zaman değerleri ile karşılaştırma (ölçülen ve hesaplanan sıcaklık farkı en fazla $\pm 0,1$) yapılarak ileri doğru iterasyonla bilinmeyen noktalarda bulunur. Böylece her zaman aralığında, tüm düğüm noktalarında ve ara yüzeylerdeki sıcaklıklar (T_D ve T_K) belirlenmiş olur.

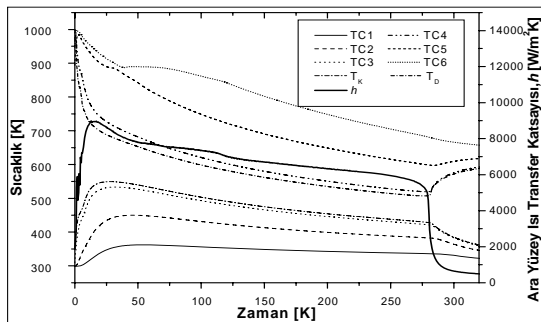
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Al-%5 Si alaşımı ve bakır soğutucu kullanılarak aynı şartlar altında iki defa tekrarlanan tek yönlü katılma deneylerinden elde edilen ve hesaplamalarda sınır şartı olarak kullanılan (TC1 ve TC6) noktalardaki soğuma eğrileri Şekil 2'de verilmiştir. Aynı noktalar için iki deney arasındaki sıcaklık farkının 6°C 'den daha az olduğu görülmüştür. Santos ve arkadaşları [9,10] saf kalay ile yaptıkları iki deney arasındaki sıcaklık farkının 4°C 'den daha az olduğunu bildirmişlerdir. Saf kalayın (ergime sıcaklığı 232°C) Al-%5 Si alaşımına (ergime sıcaklığı 632°C) göre çok daha düşük sıcaklıklarda döküldüğü göz önünde bulundurulursa sonuçların literatür ile uyum içinde olduğu söylenebilir. Deneylerin tekrar edilebilirliği kullanılan ısı çiftlerin kalibrasyonu, sıcaklık ölçüm aletinin hassasiyeti, her döküm için döküş sıcaklığının, soğutma sıvı debisinin ve döküm yüksekliğinin sabit tutulması gibi parametrelerinin kontrolü ile sağlanabilir.



Şekil 2. Al-%5 Si alaşımı ile yapılan deneylerde sıcaklık profilinin tekrarlanabilirliğinin karşılaştırılması (Comparison of reproducibility of temperature profile in experiments for Al-5%Si)

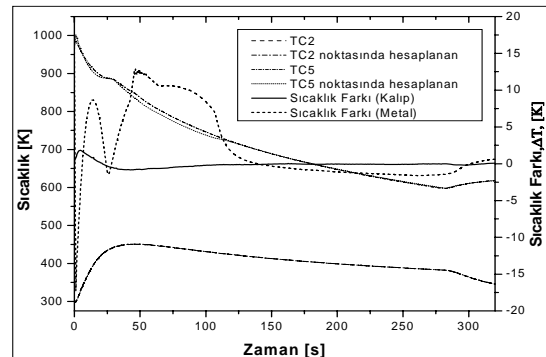
Al-%7 Si alaşımı ve bakır soğutucuda Şekil 1'de TC1, TC2 TC3, TC4, TC5 ve TC6 olarak gösterilen ısı çiftlerinden ölçülen ve ara yüzeylerde hesaplanan sıcaklık eğrileri ve bu sıcaklıkların kullanılması ile hesaplanan ara yüzey ısı transfer katsayısı Şekil 3'te verilmiştir. Hesaplar yapılırken döküm ve kalıp malzemeleri için tablo 1'de verilen termofiziksel değerler kullanılmıştır. Şekil 3'te TC1, TC2 ve TC3 sıcaklık eğrileri soğutucudan, TC4, TC5 ve TC6 sıcaklık eğrileri dökümden zamana bağlı olarak ölçülen sıcaklıklardır. T_D ve T_K döküm ve kalıp yüzeylerine denk gelen düğüm noktaları için hesaplanan sıcaklık eğrilerini göstermektedir. Ölçülen sıcaklıklarla hesap edilen sıcaklıkların uyum içinde oldukları Şekil 3'te açık bir şekilde görülmektedir. Sıvı metal dökümünü takip eden ilk bir kaç saniyede katılaşmaya başlamış ve katılaşma kalıp ara yüzeyinden yukarı doğru ilerlemiştir. Döküm metali içinde ve ara yüzeye yakın olan ısı çiftle (TC4) ölçülen sıcaklık eğrisinde yüksek soğuma şartlarından dolayı katılaşma duraklaması görülmemektedir. Buna karşın döküm metali içinde orta noktada (TC5) ölçülen sıcaklık eğrisinden görüleceği üzere 31. saniyede metalin katılaşma sıcaklığının 5 K altında bir katılaşma duraklaması meydana gelmiştir. Katılaşma döküm-kalıp ara yüzeyinden 75 mm mesafede (TC6)



Şekil 3. Al-%7 Si alaşımında döküm parça ve su soğutmalı bakır soğutucudaki altı noktadan deneysel olarak ölçülen ve yüzeylerde hesaplanan sıcaklıklar ve ısı transfer katsayısı (Measured and calculated temperatures from six locations and surfaces of Al-7%Si casting and water cooled copper chill, and superimposed heat transfer coefficient curve)

ise 40. saniyede 883 K'de başlamış ve 117. saniyede metalin ötektik katılaşma noktası olan 850 K'de tamamlanmıştır. Soğuma eğrilerinde 277. saniyede döküm sıcaklıklarında artış görülürken soğutucudaki sıcaklıklarda düşüş görülmektedir. Burada meydana gelen değişimin nedeni döküm metalinin katılaşma çekmesi sonucu soğutucu yüzeyinden ayrılarak ara yüzeyde hava boşluğunun oluşmasıdır. Hava boşluğunun oluşması ile ara yüzey ısı transfer katsayısı da ani olarak düşmüştür. Ara yüzeyde hava boşluğu oluşması ile sıcaklık eğrilerinde benzer değişimlerin olduğu literatürde açık bir şekilde belirtilmiştir [30, 47, 48].

TC1 ve TC6 hesaplamalar için sınır şartı olarak alınan değerlerdir. Döküm-soğutucu ara yüzeyinden simetrik olarak 5 mm mesafede hesap edilen sıcaklık değerleri, bu noktalarda ölçülen TC3 ve TC4 sıcaklıkları ile karşılaştırılmıştır. Bilgisayar programı bu noktalarda ölçülen ve hesap edilen sıcaklık farklarının (hassaslığın) en fazla $\pm 0,1$ 'den küçük olması durumuna kadar hesap yapmaktadır. Hesap edilen sıcaklık dağılımının kontrolünü yapmak için döküm ve soğutucu ara yüzeyden simetrik olarak 37,5 mm mesafede ölçülen (soğutucuda TC2 ve döküm metalinde TC5) ve aynı mesafede hesap edilen sıcaklıklar karşılaştırılmış ve sonuçlar Şekil 4'te verilmiştir. Bakır soğutucunun orta noktasındaki sıcaklık farkı 2 K'den daha az bulunmuştur. Dolayısı ile Şekil 4'te ölçülen sıcaklık eğrisi ile hesaplanan sıcaklık eğrisi mükemmel bir şekilde üst üste binmiştir. Döküm metalinin orta noktasında ölçülen ve hesaplanan sıcaklıklar arasındaki fark ise 14 K'den daha düşüktür. Literatürdeki çalışmalarda bu noktalardaki sıcaklık farkının ± 20 K'den küçük olması kabul edilebilir durum olduğu belirtilmektedir [23]. Bu çalışmadaki sıcaklık farkları daha önce yapılan çalışmalarda [1,2] olduğu gibi kabul edilebilir sınırlar içerisindeydi. Döküm ve kalıp malzemesinde ölçülen ve hesaplanan sıcaklıklar arasındaki bu mükemmel uyum deney düzeneğinin ve kullanılan malzemelerin termofiziksel özelliklerinin doğru

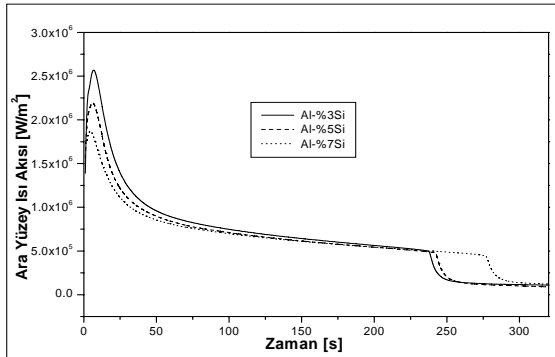


Şekil 4. Al-%7 Si döküm parça ve bakır soğutucunun orta noktalarından deneysel olarak ölçülen ve hesaplanan sıcaklık eğrileri ve sıcaklıklar arasındaki sıcaklık farkı (Measured and calculated temperatures and temperature differences of mid points of Al-7% Si casting and copper chill)

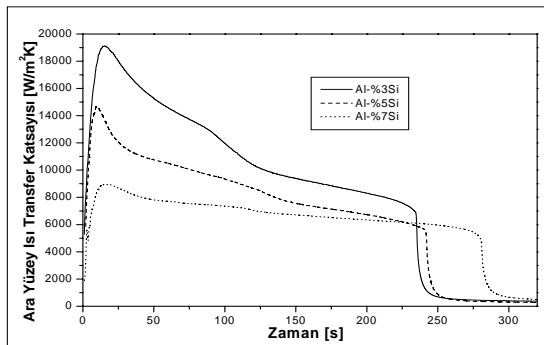
seçildiğini ve hesap yönteminin hassas olduğunu göstermektedir.

Döküm metali ve bakır soğutucuda sıcaklık dağılımları belirlendikten sonra eşitlik (2) yardımıyla %3, %5 ve %7 Si içeren Al-Si alaşımlarının ara yüzey ısı akıları hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 5'te verilmiştir. Ara yüzey ısı akısı silisyum içeriğinin artması ile azalmıştır. Sıvı metal kalıba döküldükten sonra ara yüzey ısı akıları hızlı bir şekilde artmış ve şekilden de görüleceği üzere Al-%3 Si, Al-%5 Si ve Al-%7 Si alaşımları için sırasıyla 260 kW/m², 220 kW/m² ve 185 kW/m² maksimum değerlere ulaşmıştır. Isı akıları daha sonra keskin bir düşüşü takiben zamanla sürekli olarak hafifçe azalmıştır. Ancak ara yüzeyde hava boşluğunun oluşmasıyla ısı akıları Al-%3 Si, Al-%5 Si ve Al-%7 Si alaşımları için sırasıyla 235. s, 243. s ve 277. s'de keskin bir düşüş göstermiş ve yaklaşık olarak 120 kW/m²'de sabit olarak seyretmiştir.

Her üç alaşım için eşitlik (1) yardımıyla belirlenen ara yüzey ısı transfer katsayılarının zamana bağlı olarak değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Ara yüzey ısı transfer katsayısı Al-Si alaşımındaki silisyum içeriğinin azalması ile artmıştır. Ara yüzey ısı transfer katsayılarının maksimum değerleri yaklaşık olarak 35–40 saniye arasında Al-%3 Si, Al-%5 Si ve Al-%7 Si alaşımları için sırasıyla 19100 W/m²K, 14600



Şekil 5. Al-Si alaşımlarında silisyum oranı ile ara yüzey ısı akısının değişimi. (Variation of interfacial heat flux with silicon content in Al-Si alloys.)



Şekil 6. Al-Si alaşımlarında silisyum oranı ile ara yüzey ısı transferinin katsayısının değişimi. (Variation of interfacial heat transfer coefficient with silicon content in Al-Si alloys.)

W/m²K ve 8900 W/m²K olarak tespit edilmiştir. Isı transfer katsayıları maksimum değerleri takiben hava boşluğu oluşumuna kadar sürekli olarak azalmasına devam etmiştir. Hava boşluğu oluşmasıyla birlikte keskin bir düşüş gösteren ısı transfer katsayıları daha sonra çok düşük değerlerde seyretmiştir.

Bu çalışmaya paralel olarak Fortin [5], Peres [12], Muojekwu [17] ve Michel [18] Al-Si alaşımlarında silisyum içeriğinin artmasıyla ara yüzey ısı transfer katsayısının azaldığını bildirmesine karşın Taha [8] artan silisyum miktarı ile ısı transfer katsayısının arttığını belirtmiştir.

Al-Si alaşımlarında ısı transfer katsayısının azalan silisyum içeriği ile artması aşağıdaki şekilde açıklanabilir.

Al-Si alaşımlarında silisyum miktarının azalması ile döküm metalinin ergime sıcaklığı artar. Her bir alaşım ergime sıcaklığının 150 K üzerinde dökülmüştür. Dolayısı ile %3 silisyum içeren alaşımın ergime sıcaklığı %7 silisyum içeren alaşımın ergime sıcaklığından 34 K daha yüksektir. Diğer bir ifade ile %3 silisyum içeren Al-Si alaşımı %7 silisyum içeren Al-Si alaşımına göre daha yüksek döküm sıcaklığına sahiptir. Döküm sıcaklığının artması ile viskozite ve yüzey gerilimi düşer [8–10, 17, 34, 49, 50]. Bu durum sıvı metalin soğutucu yüzeyi ile termal temasının artmasına neden olur.

Tablo 1'den görüleceği üzere Al-%7Si, Al-%5Si ve Al-%3Si alaşımlarının katılma aralığı sırasıyla 33 K, 55 K ve 67 K'dir. Geniş katılma sıcaklık aralığı sıvının metal soğutucu yüzeyinde daha uzun süre kalmasını sağlayarak katılma çekmesini daha iyi besler ve ara yüzey temasını artırır.

Al-Si alaşımlarının silisyum miktarına göre ısı iletim katsayıları sıvı durumunda önemli bir değişim göstermemesine rağmen katı durumda azalan silisyum miktarı ile artmaktadır (Tablo 1).

Ötektik altı Al-Si alaşımlarında silisyum oranının ötektik bileşime doğru artmasıyla katılma aralığı azalır ve ara yüzeyde katılma kabuk şeklinde teşekkül eder. Ara yüzeyde katı kabuğun oluşumundan dolayı döküm metali soğutucu yüzeyinden daha kısa sürede ayrılır [51]. Bu durum ısı akısı ve ısı transfer katsayısını düşürür.

Yapılan deneylerde silisyum içeriğinin azalması ile ısı akısı ve ısı transfer katsayısı artmıştır. Bu artışın yukarıda açıklanan yüksek döküm sıcaklığı, geniş katılma aralığı, ısı iletim katsayısı ve katı kabuk oluşumundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Peres [12], Michel [18], Fortin [5] ve Moujekwu'da [17] azalan silisyum miktarı ile ısı transfer katsayısının artmasını bu sebeplere bağlamışlardır. Ancak Taha [8] ara yüzeyde hava boşluğu oluşumunun alaşım tipine

bağlı olduğunu ve silisyum içeriğinin artmasıyla hava boşluğunun azaldığını belirtmiştir. Hava boşluğunun azalması da ara yüzey ısı transfer katsayısı değerini arttırdığını iddia etmektedir. Ancak Al-Si alaşımlarında silisyum içeriğinin artmasıyla ara yüzeyde hava boşluğu oluşumunun nasıl azaldığını açıklamamıştır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Al-%3 Si, Al-%5 Si ve Al-%7 Si alaşımlarında değişen silisyum içeriğine göre döküm parça-kalıp ara yüzey ısı transfer katsayılarının belirlenmesi çalışmalarında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- 1) Aynı şartlarda yapılan iki deney arasındaki sıcaklık farkı 6 K'den daha düşük ölçülmüştür. Bu da yapılan deneylerin tekrar edilebilir olduğunu göstermektedir.
- 2) Al-Si alaşımlarında %3, %5 ve %7 silisyum için maksimum ara yüzey ısı transfer katsayıları sırası ile 19100 W/m²K, 14600 W/m²K ve 8900 W/m²K, maksimum ısı akıları 260 kW/m², 220 kW/m² ve 185 kW/m² olarak ölçülmüştür.
- 3) Döküm/soğutucu ara yüzeyden simetrik olarak 37,5 mm mesafede ölçülen ve aynı mesafede hesaplanan sıcaklık farkı soğutucuda 2 K ve dökümde 14 K'den daha düşük elde edilmiştir.
- 4) Ara yüzey ısı transfer katsayısı alüminyum silisyum ikili alaşımlarında silisyum içeriğinin azalması ile artmıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmaya 07/2002–08 numaralı Bilimsel Araştırma Projesi çerçevesinde maddi destek sağlayan Gazi Üniversitesi Rektörlüğüne teşekkür ederiz.

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

q	: Isı akısı, W/m ²
\dot{q}	: Birim hacimde ısı üretim oranı, W/m ³
h	: Ara yüzey ısı transfer katsayısı, W/m ² K
T_D	: Döküm metal yüzey sıcaklığı, K
T_K	: Soğutucu metal yüzey sıcaklığı, K
T	: Sıcaklık, K
t	: Zaman, s
x	: Mesafe, m
k	: Isı iletkenlik katsayısı, W/mK
c	: Özgül ısı, J/kgK
L	: Ergime gizli ısısı, J/kg
K_0	: Ayrışma katsayısı

Yunan harfleri (Greek Letters)

ρ	: Yoğunluk, kg/m ³
Δt	: Zaman aralığı
Δx	: Mesafe aralığı

Alt indisler (Subscripts)

m	: Döküm noktası
-----	-----------------

p	: Zaman işareti
YK	: Yarı katı
D	: Döküm
K	: Kalıp

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Şahin, H.M., Kocatepe, K., Kayıkcı R. ve Akar, N., "Determination of Unidirectional Heat Transfer Coefficient during Unsteady State Solidification at Metal Chill Interface", **Energy Conversion and Management**, 47, 19–34, 2006.
2. Şahin, H.M., Kocatepe, K., Kayıkcı R. ve Akar, N., "Ötektik Al-Si Alaşımında Soğutucu Yüzey Pürüzlülüğünün Arayüzey Isı Transfer Katsayısına Etkisi", **Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi**, Cilt 21, No 3, 473-481, 2006.
3. Kim, T.G. ve Lee, Z.H., "Time-varying Heat Transfer Coefficients Between Tube-Shaped Casting and Metal Mold", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 40, 3513-3525, 1997.
4. Lee, Z.H., Kim, T.G. ve 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.
5. Fortin, G, Louchez, P. ve Samuel, F H, "Factors Controlling Heat Transfer Coefficients at the Metal-Mold Interface during Solidification of Aluminum Alloys: An Analytical Study", **AFS Transactions**, 100, 863-871, 1992.
6. Hao, S.W., Zhang, Z.Q., Chen, J.Y., ve Liu, P.C., "Heat Transfer at the Metal-Mold Interface in Ductile Iron", **AFS Transactions**, 95, 601-608, 1987.
7. Sharma, D.G.R. ve Krishnan, M., "Simulation of Heat Transfer at Casting Metal-Mold Interface", **AFS Transactions**, 99, 429-438, 1991.
8. Taha, M.A., El-Mahallawy, N.A., El-Mestekawi, M.T. ve Hassan A.A., "Estimation of Air Gap and Heat Transfer Coefficient at Different Faces of Al And Al-Si Castings Solidifying in Permanent Mould", **Materials Science And Technology**, 17, 1093-1101, 2001.
9. Santos, C.A., Quaresma, J.M.V. ve Garcia, A., "Determination of Transient Interfacial Heat Transfer Coefficients in Chill Mold Casting", **Journal of Alloys and Compounds**, 319, 174-186, 2001.
10. Santos, C.A., Siqueira, C.A., Garcia, A., Quaresma, J.V.M. ve Spim, J.A., "Metal/Mold Heat Transfer Coefficients during Horizontal and Vertical Unsteady-State Solidification of Al-Cu and Sn-Pb Alloys", **4th International Conference on Inverse Problems in Engineering**, Rio de Janeiro, Brazil, 2002.

11. Siqueira, C.A., Cheung, N. ve Garcia, A., "The Columnar To Equiaxed Transition During Solidification of Sn-Pb Alloys", **Journal of Alloys and Compounds**, 351, 126-134, 2003.
12. Peres, M.D., Siqueira, C.A. ve Garcia, A., "Macrostructural and Microstructural Development in Al-Si Alloys Directionally Solidified under Unsteady-State Conditions", **Journal of Alloys and Compounds**, 381, 168-181, 2004.
13. Santos, C.A., Siqueira, C.A., Garcia, A., Quaresma, J.M.V. ve Spim, J.A., "Metal-Mold Heat Transfer Coefficients during Horizontal and Vertical Unsteady-State Solidification of Al-Cu and Sn-Pb Alloys", **Inverse Problems in Science and Engineering**, 12, 279-296, 2004.
14. Sá, F., Rocha, O.L., Siqueira, C.A. ve Garcia, A., "The Effect of Solidification Variables on Tertiary Dendrite Arm Spacing in Unsteady-State Directional Solidification of Sn-Pb and Al-Cu Alloys", **Materials Science and Engineering A**, 373, 131-138, 2004.
15. Spinelli, J.E., Rosa, D.M., Ferreira, I.L. ve Garcia, A., "Influence of Melt Convection on Dendritic Spacing of Downward Unsteady-State Directionally Solidified Al-Cu Alloys", **Materials Science and Engineering A**, 383, 271-282, 2004.
16. Souza, E. N., Cheung, N. ve Garcia, A., "The Correlation Between Thermal Variables and Secondary Dendrite Arm Spacing During Solidification of Horizontal Cylinders of Sn-Pb Alloys" **Journal of Alloys and Compounds**, 399, 110-117, 2005.
17. Muojekwu, C.A., Samarasekera, I.V. ve Brimacombe, J.K., "Heat Transfer and Microstructure during The Early Stages of Metal Solidification", **Metallurgical and Materials Transactions B**, 26, 361-382, 1995.
18. Michel, F., Louchez, P. R. ve 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.
19. Krishnan, M. ve Sharma, D.G.R., "Determination of Heat Transfer Coefficient between Casting and Chill in Unidirectional Heat Flow", **AFS Transactions**, 102, 769-774, 1994.
20. Krishnan, M. ve Sharma, D.G.R., "The Effect of Alloy Properties on the Heat Flow across the Casting-Mold Interface", **Scripta Metallurgica et Materialia**, 28, 447-451, 1993.
21. Narayan Prabhu, K. ve Ravishankar, B.N., "Effect of Modification Melt Treatment on Casting/Chill Interfacial Heat Transfer and Electrical Conductivity of Al-13% Si Alloy", **Materials Science and Engineering A**, 360, 293-298, 2003.
22. Suly, L.J.D., "The Thermal Interface between Casting and Chill Moulds", **AFS Transactions**, 84, 735-744, 1976.
23. Prabhu, K.N. ve Griffiths, W.D., "Assessment of Metal/Mould Interfacial Heat Transfer during Solidification of Cast Iron" **Third International Conference on Solidification and Gravity**, Miskolc, Hungary, 455-461, 1999.
24. Lau, F., Lee, W.B., Xiong, S.M. ve Liu, B.C., "A Study of The Interfacial Heat Transfer between an Iron Casting and a Metallic Mould", **Journal of Materials Processing Technology**, 79, 25-29, 1998.
25. Broucaret, S., Michrafy, A. ve Dour, G., "Heat Transfer and Thermo-Mechanical Stresses in a Gravity Casting Die Influence of Process Parameters", **Journal of Materials Processing Thecnology**, 110, 211-217, 2001.
26. Hallam, C.P. ve Griffiths, W.D., "A Model of the Interfacial Heat-Transfer Coefficient for the Aluminum Gravity Die-Casting Process", **Metallurgical and Materials Transactions B**, 35, 721-733, 2004.
27. Gozlan, E. ve Bamberger, M., "Heat Flow and Solidification in A Metal Mould" **Zeitschrift für Metallkunde**, 78, 677-682, 1987.
28. 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, 123-129, 1982.
29. Hallam, C.P., Griffiths, W.D. ve Butler, N.D., "Interfacial Heat Transfer between A Solidifying Aluminum Alloy and A Coated Die Steel", **Materials Science Forums**, 329-330, 467-472, 2000.
30. Ho, K. ve Pehlke, R D ; "Mechanisms of Heat Transfer at A Metal-Mold Interface"; **AFS Transactions**, 92, 587-598, 1984.
31. Hou, T.X. ve Pehlke, R.D., "Determination of Mold-Metal Interfacial Heat Transfer and Simulation of Solidification of An Al-%13 Si Casting", **AFS Transactions**, 96, 129-136, 1998.
32. Ho, K. ve Pehlke, R.D., "Transient Methods for Determination of Metal-Mold Interfacial Heat Transfer", **AFS Transactions**, 91, 689-698, 1983.
33. Nishida, Y., Droste, W. ve Engler, S., "The Air-gap Formation Process at the Casting-Mold interface and the Heat Transfer Mechanism Through the Air-gap", **Met. Transactions B**, 17, 833-844, 1986.
34. Liu, W., Wang G X., ve Matthys, E.F., "Thermal Analysis and Measurements for A Molten Metal Drop Impacting on A Substrate, Cooling, Solidification and Heat Transfer Coefficient", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 38, 1387-1395, 1995.
35. Trovant, M. ve Argyropoulos, S.A., "The Implementation of A Mathematical Model To

- Characterize Mold Metal Interface Effects in Metal Casting”, **Canadian Metallurgical Quarterly**, 37, 185-196, 1998.
36. Parker, J.K. ve Piwonka, T.S., “Gap Formation in Resin-Bonded Molds”, **AFS Transactions**, 108, 239-245, 2000.
 37. Hwang, J.C., Chuang, H.T., Jong, S.H. ve Hwang, W.S., “Measurement of Heat Transfer Coefficient at Metal-Mold Interface during Casting”, **AFS Transactions**, 102, 877-883, 1994.
 38. Coates, B.L., **Heat Transfer of the Casting Metal/Mold Interface during Solidification**, PhD Thesis, Graduate Department of Materials Science and Engineering, University of Toronto, Toronto, Canada, 129-192, 2004.
 39. Hartley, J.G. ve Patterson, J.A.L., “The Influence of Temperature, Moisture Content and Binder Content on the Conductivity of Dried Bentonite-Bonded Zirkon and Silica Sands”, **AFS Transactions**, 91, 183-190, 1983.
 40. Kannaiah, P., Narayana, K.L. ve Roshan, H. Md., “Thermal Properties of Molding Sands, Casting-Over Probe Embedded Specimen Method”, **AFS Transactions**, 95, 591-600, 1987.
 41. Hartley, J.G., Babcock, D. ve Berry, J.T., “The Thermal Conductivity of Bentonite-Bonded Molding Sands”, **AFS Transactions**, 89, 469-476, 1981.
 42. Bandyopadhyay, B.P., Joshi, M.D. ve Chakraborty, P.N., “A Transient Method of Simultaneous Measurement of Thermal Properties of Moulding Sand Using Plane Heat Source”, **British Foundryman**, 77, 318-321, 1984.
 43. Seshadri, M.R. ve Ramachandran, A., “Mold Materials Thermal Properties”, **AFS Transactions**, 69, 616-624, 1961.
 44. Krishnan, M. ve Sharma, D.G.R., “Determination of the Interfacial Heat Transfer Coefficient h in Unidirectional Heat Flow by Beck’s Non Linear Estimation Procedure”, **Int. Comm. Heat Mass Transfer**, 23, 203-214, 1996.
 45. Özişik, M.N., **Finite Difference Methods in Heat Transfer**, Mechanical and Aerospace Engineering Department, North Carolina State University, ABD, 1994.
 46. Incropera, F.P. ve Dewitt, D.P., **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**, John Wiley & Sons, Purdue University, School of Mechanical Engineering, ABD, 1996.
 47. Kayıkcı, R. ve Griffiths, W.D., “The Influence of Surface Roughness on Interfacial Heat Transfer during Casting Solidification”, **Foundryman**, 92, 267-273, 1999.
 48. Kayıkcı, R., **Metal-Mold Contact and Heat Transfer during Casting Solidification**, PhD Thesis, Manchester Materials Science Centre, University of Manchester and UMIST, Manchester, 77-181, 1999.
 49. Wang, G.-X. ve 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.
 50. Gafur, M. A., Nasrul Haque, M. ve Narayan Prabhu, K., “Effect of Chill Thickness and Superheat on Casting/Chill Interfacial Heat Transfer during Solidification of Commercially Pure Aluminum”, **Journal of Materials Processing Technology**, 133, 257-265, 2003.
 51. Akar, N., **Katılaşma Sırasında Döküm-Kalıp Ara Yüzeyinde Isı Transfer Katsayısının İncelenmesi**, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.

