

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»
Российская академия естественных наук

**ВЕСТНИК
ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ СЕКЦИИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК**

Отделение металлургии

Сборник научных трудов

Издается с 1994 г. ежегодно

Выпуск 40

Москва
Новокузнецк
2018

УДК 669.1(06)+669.2/.8.(06)+621.762(06)+669.017(06)

ББК 34.3я4

В 387

В 387 Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. Вып. 40 / Редкол.: Е.В. Протопопов (главн. ред.), М.В. Темлянец (зам. главн. ред.), Г.В. Галевский (зам. главн. ред.) [и др.]: Сибирский государственный индустриальный университет. – Новокузнецк, 2018 – 178 с., ил.

Издание сборника статей, подготовленных авторскими коллективами, возглавляемыми действительными членами и членами-корреспондентами РАЕН, других профессиональных академий, профессорами вузов России. Представлены работы по различным направлениям исследований в области металлургии черных и цветных металлов и сплавов, порошковой металлургии и композиционных материалов, физики металлов и металловедения, экономики и управления на предприятиях.

Сборник реферируется в РЖ Металлургия.

Электронная версия сборника представлена на сайте <http://www.sibsiu.ru> в разделе «Научные издания»

Ил. 57, табл. 16, библиогр. назв. 244.

Редакционная коллегия: Аренс В.Ж., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН, вице-президент РАЕН, г. Москва; Райков Ю.Н., д.т.н., д.ч. РАЕН, председатель горно-металлургической секции РАЕН, ОАО «Институт Цветметобработка», г. Москва; Протопопов Е.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (главный редактор), СибГИУ, г. Новокузнецк; Темлянец М.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (зам. главного редактора), СибГИУ, г. Новокузнецк; Галевский Г.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (зам. главного редактора), СибГИУ, г. Новокузнецк; Буторина И.В., д.т.н., проф., СПбГПУ, г. Санкт-Петербург; Волокитин Г.Г., д.т.н., проф., д.ч. МАНЭБ, ТГАСУ, г. Томск; Медведев А.С., д.т.н., проф., д.ч. МАН ВШ, НИТУ «МИСиС», г. Москва; Максимов А.А., д.т.н., проф., г. Новокузнецк; Немчинова Н.В., д.т.н., проф., ИрНИТУ, г. Иркутск; Руднева В.В., д.т.н., проф. (отв. секретарь), СибГИУ, г. Новокузнецк; Спиринов Н.А., д.т.н., проф., д.ч. АИН, УрФУ, г. Екатеринбург; Черепанов А.Н., д.ф.-м.н., проф., член РНК ТММ, ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск; Юрьев А.Б., д.т.н., проф., АО «Евраз – ЗСМК», г. Новокузнецк.

УДК 669.1(06)+669.2/.8.(06)+621.762(06)+669.017(06)

ББК 34.3я4

© Сибирский государственный индустриальный университет, 2018

Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	6
МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ.....	7
<i>А.М. Достоева, Д.У. Смагулов, Н.В. Немчинова</i>	
Исследование фазовых превращений в системе Al-Zr-Fe-Si.....	8
<i>И.Н. Кель, В.И. Жучков</i>	
Эффективное применение борсодержащих материалов в современных металлургических технологиях.....	15
<i>А.В. Настюшкина, Е.А. Шевченко, А.А. Шевченко</i>	
Анализ технологии дефосфорации стали в условиях АО «Уральская сталь».....	22
<i>С.Н. Анучкин</i>	
Взаимодействие наночастиц ZrO ₂ с расплавом никель-олово.....	25
<i>В.Б. Деев, А.И. Куценко, Е.С. Прусов, С.В. Сметанюк, О.Г. Приходько, К.В. Пономарева, А.А. Сокорев</i>	
Определение доли твердой фазы по данным компьютерного термического анализа процесса кристаллизации расплава.....	34
<i>Г.Е. Левшин</i>	
Многовариантный подход к расчету параметров магнитопроводов индукционных тигельных печей.....	40
<i>О.В. Кузнецова, М.В. Темлянец, Е.Н. Темлянцева</i>	
К вопросу об учете неравномерности перемещения заготовок при математическом моделировании процессов нагрева металла в методических печах.....	49
<i>С.А. Кондрашов, Э.М. Голубчик, Т.Ю. Мартынова</i>	
Новая технология производства холоднокатанного металла в условиях стана 2500.....	53
<i>Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, Р.Е. Крюков</i>	
Совершенствование технологии электроконтактной сварки и термообработки железнодорожных рельсов.....	63
ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	69
<i>А.Е. Аникин, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, И.В. Ноздрин</i>	
Физико-химическая аттестация железосодержащего техногенного сырья.....	70
<i>А.Е. Аникин, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, Н.М. Кулагин, В.В. Васильев, Г.Н. Черновский</i>	
Природные твердые углеродистые материалы в современной металлургии: виды, свойства, применение.....	78

<i>А.Е. Аникин, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, Н.М. Кулагин, В.В. Васильев, Г.Н. Черновский</i>	
Искусственные твердые углеродистые материалы в современной металлургии.....	89
ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ.....	98
<i>А.А. Иванов, Т.Н. Осколкова</i>	
Вакуумная термическая обработка стали 30ХГСА.....	99
<i>Е.С. Прусов, Д.А. Ткач, В.Б. Деев, Е.М. Рахуба</i>	
Количественный анализ структуры композиционных сплавов с применением программы ImageJ	106
<i>В.А. Кузнецов, Р.А. Шевченко, А.А. Усольцев, Н.А. Козырев, Р.Е. Крюков</i>	
Методика определения электрического сопротивления рельсовой стали....	111
<i>Е.А. Шур, В.Н. Цвигун, Р.С. Койнов</i>	
Модели образования фрактографических рельефов на усталостных трещинах.....	118
ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОЛОГИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ..	136
<i>А.В. Феоктистов, О.Г. Приходько, К.В. Пономарева, С.В. Морин, О.В. Гордеева</i>	
Применение подходов проектного менеджмента при производстве рельсовой продукции на АО «ЕВРАЗ ЗСМК»	137
<i>Л.Б. Павлович, З.Р.Исмагилов, К.А. Дятлова</i>	
Оценка каталитических свойств отвального силикомарганцевого шлака Кузбасса.....	139
<i>А.К. Соколов</i>	
Повышение эффективности энергосбережения при эксплуатации многозонных проходных печей.....	147
<i>А.И. Куценко, Е.Г. Лашкова</i>	
Корпоративная идентификация бизнеса как составляющая стратегического репутационного развития организации	154
ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ.....	169
<i>Ю.К. Осипов, О.В. Матехина</i>	
Архитектурное проектирование как образовательный процесс.....	170
К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ.....	176

УДК 621.74:669.018.9

*В.Б. Деев¹, А.И. Куценко², Е.С. Прусов³, С.В. Сметанюк¹,
О.Г. Приходько², К.В. Пономарева², А.А. Соколев¹*

¹ ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия

² ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк, Россия

³ ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых», г. Владимир, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛИ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ПО ДАННЫМ КОМПЬЮТЕРНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ РАСПЛАВА

В статье представлена математическая модель для определения объемной доли твердой фазы при кристаллизации расплава по данным компьютерного термического анализа (СА-ССА). Показана перспективность использования разработанной методики для оценки эффективности различных методов обработки металлических расплавов.

The paper presents a mathematical model for the determination of the volume fraction of a solid phase at the crystallization of a melt according to Computer Aided Cooling Curve Analysis (CA-CCA). The prospects of using the developed methodology for evaluating the efficiency of various methods for metallic melts treatment are shown.

Модифицирующая обработка является одним из эффективных способов управления структурой и свойствами алюминиевых сплавов. Традиционные широко применяемые модификаторы (натрий, фосфор, титан, бор, стронций и т.д.) позволяют существенно повысить качество отливок из доэвтектических и заэвтектических силуминов [1-3]. Однако изыскания новых модификаторов и разработка более эффективных способов модифицирования алюминиевых сплавов продолжают вызывать практический интерес у металлургов и литейщиков [4-6].

Физические методы модифицирующей обработки алюминиевых расплавов обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными способами модифицирования: не требуют использования дорогостоящих модифицирующих присадок, не оказывают влияния на изменение химического состава сплава, более благоприятны с экологической точки зрения. К настоящему времени успешно опробованы такие физические методы мо-

дифицирующей обработки алюминиевых расплавов, как вибрационные [7], ультразвуковые [8], электрические [9], электромагнитные [10], термовременные [11] и др. Однако для промышленного изготовления фасонных отливок эти технологии пока используются весьма ограниченно, что связано с недостаточной изученностью процессов и отсутствием сведений об оптимальных режимах обработки для различных сплавов и технологических процессов плавки и литья. В этой связи актуальной задачей является оценка эффективности различных методов обработки расплава, при этом одним из показателей может служить доля твердой фазы при кристаллизации расплава.

Экспериментальное определение доли твердой фазы осуществляли с помощью методов термического и дифференциально-термического анализа при кристаллизации и затвердевании в песчано-глинистой форме цилиндрических образцов с приведенным размером 0,006 м ($\varnothing 26$ мм \times 300 мм). Методика применима при выполнении компьютерного термического анализа затвердевающих расплавов в пробе (образце) с использованием методов цифровой регистрации и обработки данных (Computer Aided Cooling Curve Analysis, CA-CCA) [12].

Для определения объемной доли твердой фазы в затвердевающей пробе при использовании метода CA-CCA разработана следующая математическая модель. Уравнения теплового баланса для системы «отливка-форма» можно записать как:

$$\frac{dQ}{dt} - mc_p \frac{dT}{dt} = \alpha F (T - T_0), \quad (1)$$

где m – масса расплава в пробе; α – коэффициент теплопередачи; c_p – теплоемкость сплава; F – площадь поверхности пробы; T – температура сплава в пробе; T_0 – температура окружающей среды; t – время; Q – общее количество скрытой теплоты затвердевания, выделившейся при затвердевании сплава в интервале кристаллизации.

В сочетании с уравнением Ньютона-Рихмана для системы «отливка-форма» можно записать:

$$q\rho \frac{dV_S}{dT} - c_p \rho V_0 \frac{dT}{dt} = \alpha F (T(t) - T_0), \quad (2)$$

где V_0 и V_S – объем пробы расплава и объем твердой фазы; ρ – плотность сплава; $q=Q/m$ – скрытая теплота затвердевания; $T(t)$ – температура образца как функция времени.

Объемная доля твердой фазы в каждый период времени в интервале кристаллизации сплава может быть рассчитана как:

$$\varphi(t) = \frac{V_f(t)}{V_0}. \quad (3)$$

Температура пробы до и после затвердевания экспоненциально уменьшается в соответствии со следующим законом:

$$\Delta T(t) = T(t) - T_0 = \Delta T_0 \exp(-\alpha t). \quad (4)$$

Температура пробы в интервале кристаллизации T_L и T_S (T_L и T_S – температуры ликвидус и солидус сплава соответственно), принимая, что $\alpha(T_S - T_L) \ll 1$ как функция времени может быть записана в виде:

$$\Delta T(t) \approx \Delta T_0 \exp(-\alpha t) + \frac{q}{c_p} \varphi(t). \quad (5)$$

В момент завершения затвердевания сплава (t_S), когда $V_0 = V_S$, может быть вычислено соотношение

$$\frac{q}{c_p} = \Delta T(t_S) - \exp(-\alpha t_S). \quad (6)$$

Коэффициент теплопередачи α зависит от температуры пробы и эмпирически находится аппроксимацией полиномом третьей степени для начальной и конечной части кривой охлаждения без фазовых превращений согласно уравнению (3):

$$\alpha(T) = a_0 + \int_{i=1}^3 a_i T^i. \quad (7)$$

Таким образом, объемная доля твердой фазы в каждый момент времени в интервале кристаллизации сплава может быть рассчитана как:

$$\varphi(t) = \frac{V_f(t)}{V_0} = k(T) \int_{t_L}^t (T(t) - T_0) dt + \frac{(T(t) - T_L)}{\Delta T(t_S) - \exp(-\alpha t_S)} \quad (8)$$

где t_L – момент времени достижения расплавом температуры ликвидус;

$k(T)$ – коэффициент, который может быть определен эмпирически для состояния пробы, когда $\varphi(t_S) = 1$ – полностью затвердевшая проба или более точно рассчитан согласно выражению

$$k(T) = \frac{\alpha(T)F}{q\rho V_0}. \quad (9)$$

Для определения температур начала и окончания затвердевания сплавов использовали кривые дифференциального термического анализа залитой пробы (показано на рисунке 1 на примере сплава А356).

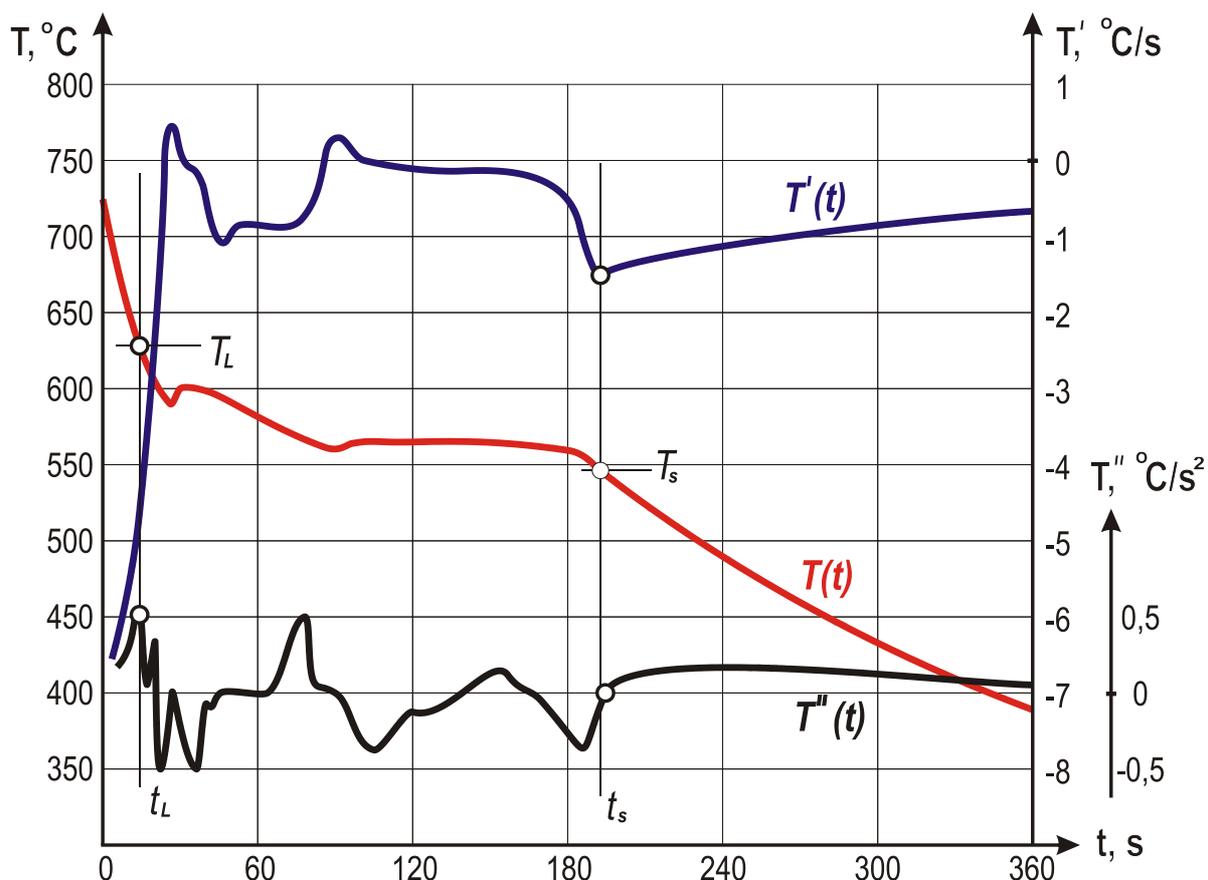


Рисунок 1 – Характерная термограмма сплава А356

Температура солидус рассчитывалась на основе анализа первой производной полученной термограммы $T'(t)$, ликвидус – на основе анализа второй производной термограммы $T''(t)$. При высоких шумовых помехах температурных измерений для определения температуры ликвидус использовалось вейвлет-преобразование сигнала на основе нормированной второй производной от Гауссиана. Таким образом, разработанные математическая модель и алгоритм расчета позволяют определять долю твердой фазы с использованием методов СА–ССА анализа в интервале кристаллизации сплавов, что было экспериментально подтверждено на примере сплава А356 [13].

Перспективным направлением дальнейших исследований является изучение влияния физических воздействий на формирование структуры и свойств литейных алюмоматричных композитов [14-16]. Предполагается, что применение внешних физических воздействий при плавке и литье позволит целенаправленно управлять структурой металлокомпозитов, обеспечивая заданную степень межфазного взаимодействия и между матричным материалом и армирующей фазой, а также равномерное распределение армирующих компонентов по объему расплава. Отдельные результаты (в частности [17]) свидетельствуют, что для эндогенно-армированных

композитов эффективным способом управления процессами структурообразования может быть температурно-временная обработка композиционного расплава.

Выводы:

Разработанные математическая модель и алгоритм расчета позволяют определять долю твердой фазы с использованием метода компьютерного термического анализа в интервале кристаллизации сплавов при оценке эффективности различных методов обработки расплава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sigworth G.K., Kuhn T.A. Grain refinement of aluminum casting alloys // *International Journal of Metalcasting*. 2007. Vol. 1. P. 31-40.
2. Li P., Liu S., Zhang L., Liu X. Grain refinement of A356 alloy by Al-Ti-B-C master alloy and its effect on mechanical properties // *Materials & Design*. 2013. Vol. 7. P. 522-528.
3. Meena P.C., Sharma A., Singh S. Effect of grain refinement on microstructure and wear behavior of cast Al-7Si alloys // *Metallurgia Italiana*. 2015. No. 1. P. 25-34.
4. Wannasin J., Canyook R., Wisutmethangoon S., Flemings M.C. Grain refinement behavior of an aluminum alloy by inoculation and dynamic nucleation // *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61. P. 3897-3903.
5. Easton M.A., Qian M., Prasad A., St. John D.H. Recent advances in grain refinement of light metals and alloys // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2016. Vol. 20. P. 13-24.
6. Guan R.G., Tie D. A Review on grain refinement of aluminum alloys: progresses, challenges and prospects // *Acta Metallurgica Sinica*. 2017. Vol. 30. P. 409-432.
7. Vorozhtsov S., Kudryashova O., Promakhov V., Dammer V., Vorozhtsov A. Theoretical and experimental investigations of the process of vibration treatment of liquid metals containing nanoparticles // *JOM*. Vol. 2016. Vol. 68. P. 3094-3100.
8. Eskin D.G. Ultrasonic processing of molten and solidifying aluminium alloys: overview and outlook // *Materials Science and Technology*. Vol. 2017. Vol. 33. P. 636-645.
9. Zhang Y., Rabiger D., Willers B., Eckert S. The effect of pulsed electrical currents on the formation of macrosegregation in solidifying Al-Si hypoeutectic phases // *International Journal of Cast Metals Research*. 2017. Vol. 30. P. 13-19.
10. Timoshkin I.Y., Nikitin K.V., Nikitin V.I., Deev V.B. Influence of treatment of melts by electromagnetic acoustic fields on the structure and prop-

erties of alloys of the Al–Si system // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2016. Vol. 57. P. 419-423.

11. Селянин И.Ф., Деев В.Б., Белов Н.А., Приходько О.Г., Пономарева К.В. Физические модифицирующие воздействия и их влияние на кристаллизацию литейных сплавов // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2015. № 3. С. 56-59.

12. Sudheer R., Prabhu K.N. A Computer Aided Cooling Curve Analysis method to study phase change materials for thermal energy storage applications // Materials & Design. 2016. Vol. 95. P. 198-203.

13. Deev V.B., Prusov E.S., Kutsenko A.I. Theoretical and experimental evaluation of the effectiveness of aluminum melt treatment by physical methods // Metallurgia Italiana. 2018. No. 2. P. 16-24.

14. Евдокимов И.А., Прусов Е.С., Киреев А.В. Модифицированные углеродными наноструктурами функциональные металломатричные композиционные материалы на основе алюминия и его сплавов с повышенными механическими и эксплуатационными свойствами // Ползуновский альманах. 2010. № 2. С. 264-268.

15. Prusov E.S., Panfilov A.A. Properties of cast aluminum-based composite alloys reinforced by endogenous and exogenous phases // Russian Metallurgy (Metally). 2011. Vol. 7. P. 670-674.

16. Прусов Е.С., Панфилов А.А., Кечин В.А. Роль порошковых прекурсоров при получении композиционных сплавов жидкофазными методами // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2016. № 2. С. 47-58.

17. Прусов Е.С., Деев В.Б., Рахуба Е.М. Влияние температурно-временной обработки расплава на структуру и свойства эвтектических композитов системы Al-Si-Mg // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2017. № 39. С. 170-174.