

3'2013  
Специальный выпуск

<http://www.limrb.by>

ISSN1683-6065

# ДИТТРЕ МЕТАЛЛУРГИЯ



Государственное предприятие «ГЗЛин»  
Филиал «Обособленное литейное производство»



## sinto

HEINRICH WAGNER SINTO

Maschinenfabrik GmbH SINTOKOGIO GROUP

Bahnhofstraße 101 · 57334 Bad Laasphe, Germany

Phone +49 (0) 2752 907-0 · Fax +49 (0) 2752 907-280

[www.wagner-sinto.de](http://www.wagner-sinto.de)

SIA „SLAM INDUSTRIAL ENGINEERING“

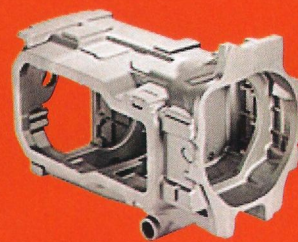
114 Nekrasova str., block 62, office 16

Minsk, 220068

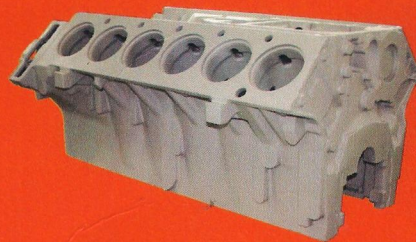
Belarus

Tel/Fax: +375 172 878 144 · e-mail: [info@siaslam.com](mailto:info@siaslam.com)

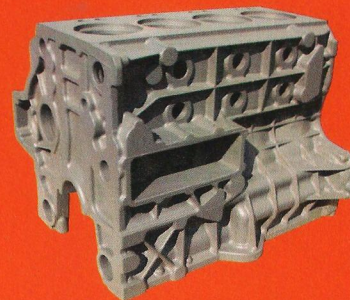
MADE IN GERMANY



- Коробка передач  
Вес 330 кг, материал: СЧ 25



- 12-цилиндровый блок двигателя  
11600 мм x 900 мм x 560 мм,  
Вес: 560 кг, Материал: СЧ 30



- 4-цилиндровый блок дизельного двигателя (песчано-глинистая формовка, опочная)  
материал: серый чугун,  
вес: 320 кг



## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Кукуй Д. М. (гл. редактор), д-р техн. наук, проф.  
 Марукович Е. И. (зам. гл. редактора по литейному производству), акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф.  
 Борщов С. М. (зам. гл. редактора по металлургии)  
 Бевза В. Ф., канд. техн. наук  
 Витязь П. А., акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф.  
 Волков А. В.  
 Гордиенко А. И., акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф.  
 Грицаенко В. И.  
 Дибров И. А. (Россия), д-р техн. наук, проф.  
 Иваницкий Н. И., канд. техн. наук  
 Калиниченко А. С., д-р техн. наук  
 Карась А. Н.  
 Клубович В. В., акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф.  
 Ловшенко Г. Ф., д-р техн. наук, проф.  
 Маточкин В. А., канд. техн. наук  
 Маяускас Э. П. (Литва), д-р наук  
 Мельников А. П., канд. техн. наук  
 Муриков М. А.  
 Мушна К. (Германия), д-р наук  
 Найдек В. Л. (Украина), акад. НАН Украины, д-р техн. наук, проф.  
 Пантелеенко Ф. И., чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф.  
 Перетягина Е. А.  
 Плесакачевский Ю. М., чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф.  
 Сайков М. А., канд. техн. наук  
 Стеценко В. Ю., канд. техн. наук  
 Чичко А. Н., д-р физ.-мат. наук, проф.  
 Шипко А. А., д-р техн. наук, проф.

## РЕДАКЦИЯ

Машканова С. В. (редактор)  
 Вольнец П. В. (компьютерная верстка, дизайн)  
 Голосюк Н. В. (менеджмент)

## АДРЕС РЕДАКЦИИ

Беларусь, 220013, Минск,  
 пр. Независимости, 65,  
 тел.: (017) 292-74-75, (017) 292-50-60,  
 тел./факс: (017) 331-11-16.  
 E-mail: limrb@tut.by  
 Сайт: limrb.by

Журнал зарегистрирован  
 в Министерстве информации  
 Республики Беларусь.  
 Свидетельство о регистрации № 1244  
 от 31 мая 2012 г.

Подписано в печать 5.10.2013.  
 Выход в свет 20.10.2013.  
 Формат 60x84%.  
 Цена свободная

Редакция не несет ответственности  
 за содержание рекламных объявлений.  
 Перепечатка материалов, публикуемых  
 в журнале «Литье и металлургия»,  
 осуществляется только  
 с разрешения редакции.

Сандомирский С. Г., ОИМ НАН Беларуси, Цукерман В. Л., ИПФ НАН Беларуси Возможности сортировки отливок из высокопрочного и серого чугуна по структуре по результату измерения магнитного параметра и скорости звука . . . . .	90
Лазаренков А. М., Хорева С. А., Мельниченко В. В., БНТУ Комплексная оценка условий труда работающих в цехах специального литья . . . . .	94
Ердаков И. Н., Южно-Уральский государственный университет Управление процессом формирования структуры отливки импульсным электромагнитным полем . . . . .	103
Иванов М. А., Швецов В. И., Южно-Уральский государственный университет Влияние скорости охлаждения сплава на процесс образования трещин в отливках . . . . .	106
Яркович В. М. Особенности создания и развития систем менеджмента качества литейных производств . . . . .	109
Смыков А. Ф., Моисеев В. С., МАТИ-РГТУ им. К. Э. Циолковского Универсализация САПР ТП фасонного литья на основе поузлового расчета затвердевания отливки . . . . .	111
Чигиринский В. В., Шейко С. П., Запорожский национальный технический университет Влияние параметров пластической деформации на структурно-фазовые превращения в металлах различного назначения . . . . .	113
Стеценко В. Ю., Баранов К. Н., Гутев А. П., ИТМ НАН Беларуси Способ охлаждения отливок из силумина АК15М3 при вертикальном центробежном литье . . . . .	116
Стеценко В. Ю., Баранов К. Н., Коновалов Р. В., ИТМ НАН Беларуси Влияние охлаждения изложницы на структуру отливок силумина АК15М3 при вертикальном центробежном литье . . . . .	118
Марукович Е. И., Брановицкий А. М., Лебединский Ю. А., Харьков В. А., Саченко Ю. В., ИТМ НАН Беларуси Непрерывное горизонтальное литье трубной бронзовой заготовки . . . . .	121
Стеценко В. Ю., Баранов К. Н., Новиков В. В., ИТМ НАН Беларуси Влияние гравитационного коэффициента на структуру центробежных отливок из силумина АК18 . . . . .	125
Волков Д. А., Волков А. Д., ОАО «БЕЛНИИЛИТ» Технология изготовления короткомерных трубных заготовок методом центробежного литья . . . . .	128
Тихомирова И. М., Клименок Е. В., БНТУ, научный руководитель – канд. техн. наук Крутилин А. Н., БНТУ Разработка технологии изготовления отливки литьем по газифицируемым моделям . . . . .	132
Слетова Н. В., СРО РАЛ, Вольнов И. Н., МГИУ, Задруцкий С. П., БНТУ, Чайкин В. А., филиал МГОУ Моделирование процесса удаления неметаллических включений в алюминиевых сплавах с использованием программы FLOW-3D . . . . .	138
Чайкин А. В., СРО РАЛ, Колколова А. В., Гушин А. И., ООО «СЗТЛ», Чайкин В. А., филиал МГОУ Совершенствование технологии выплавки сталей в кислых и основных дуговых электропечах в условиях ООО «Самарский завод технического литья» с применением дисперсных материалов . . . . .	141
Садох М. А., Мельников А. П., Миронов А. С., Рак И. В., ОАО «БЕЛНИИЛИТ» Технологические особенности производства отливок из алюминиевых сплавов методом литья в кокиль . . . . .	145
Чичко А. Н., Лихозов С. Г., Сачек О. А., Яцкевич Ю. В., Соболев В. Ф., Матюшинец Т. В., Чичко О. И., БНТУ Клеточно-автоматное моделирование распределения усадочных дефектов в отливке «Корпус Подшипника» с прибылью при различных подводах металла . . . . .	149
Анисович А. Г., Румянцева И. Н., ФТИ НАН Беларуси Визуализация поверхности методом дифференциально-интерференционного контраста . . . . .	156
Пугачев И. А., Суслов А. А., Липецкий государственный технический университет Уравнения затвердевания непрерывного слитка для систем управления процессом непрерывной разливки МНЛЗ . . . . .	163
Суслов А. А., Пугачев И. А., Липецкий государственный технический университет Исследование кавитационно-эрозийной стойкости чугуна с различной формой графита . . . . .	167
Маймур Я. С., Национальная металлургическая академия Украины Сравнительный анализ технологий литья прокатных валков исполнения ЛШ-57 . . . . .	171





УДК 621.74

Поступила 02.09.2013

Н. В. СЛЕТОВА, СРО РАЛ, И. Н. ВОЛЬНОВ, МГИУ, С. П. ЗАДРУЦКИЙ, БНТУ,  
В. А. ЧАЙКИН, филиал МГОУ

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ FLOW-3D®

*Показано, что перспективными, с точки зрения экологической безопасности, материалами для изготовления рафинирующих препаратов для силуминов являются карбонаты кальция и стронция. Принципиальная возможность использования дисперсных карбонатов в рафинирующих смесях подтверждает моделирование процесса удаления неметаллических включений в алюминиевых сплавах с использованием программы FLOW-3D. Высокая эффективность рафинирующей смеси с модифицирующим эффектом подтверждается промышленными испытаниями.*

*The perspective materials for making fining preparations for the silumins are the calcium and strontium carbonates from the environmental safety point of view are shown. Principle possibility of using dispersed carbonates in the fining mixtures is confirmed by late inoculation process research using simulation FLOW-3D. The high efficiency of the fining mixture with the inoculants effect is confirmed by the industrial tests.*

Известно, что наибольшее негативное влияние на свойства отливок из алюминиевых сплавов оказывают присутствующие в нем пленообразные включения оксида алюминия и водород, поэтому расплав перед разливкой подлежит обязательному рафинированию. В промышленных условиях наиболее технологичным и эффективным методом рафинирования алюминиевых сплавов является обработка расплава специальными солевыми композициями на основе хлор- и фторсодержащих соединений, что сопровождается выделением токсичных веществ, ухудшающих экологическую обстановку в цехе и отрицательно влияющих на здоровье работающего персонала.

В качестве классического модификатора на постсоветском пространстве используют натрий. Для ввода Na в расплав традиционно применяют его фторид, что сопровождается выделением токсичных фтористых соединений.

Исходя из сказанного выше, разработка экологически безвредных, высокоэффективных, не требующих использования дорогостоящего оборудования материалов для проведения рафинирующей и модифицирующей обработок расплавов на основе алюминия и технологий их применения весьма актуальна. Наиболее перспективными для решения этих задач служат карбонаты кальция и стронция.

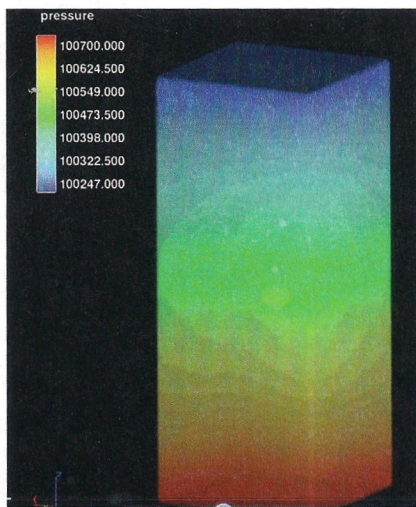
Термодинамическое моделирование вероятных химических и фазовых превращений в системах

$\text{CaCO}_3\text{-Al}$  и  $\text{SrCO}_3\text{-Al-Si}$  в температурном диапазоне 943–1173 К при глубине погружения карбонатов в расплав до 1 м с помощью программного комплекса HSC CHEMISTRY позволило установить возможность протекания газотворных реакций  $3\text{CaCO}_3 + 2\text{Al} \rightarrow 3\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{CO}$  и  $2\text{SrCO}_3 + 2\text{Al} \rightarrow 2\text{Sr} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CO} + \text{CO}_2$  [1, 2]. В результате реакций создаются потоки рафинирующего газа CO. Для подтверждения рафинирующей способности образующегося газа в программном комплексе FLOW-3D® – гидродинамическом пакете общего назначения произвели моделирование процесса удаления оксидов алюминия с помощью всплывающих в металлическом расплаве пузырьков газа.

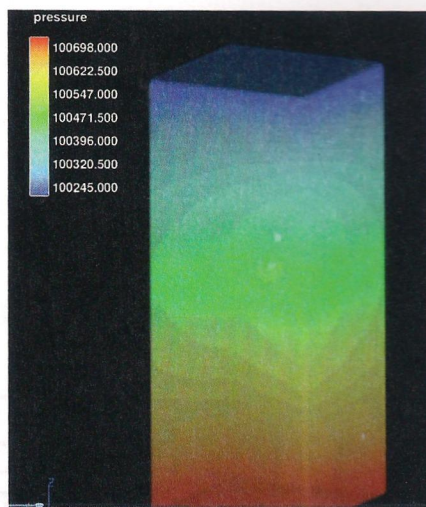
Главная цель моделирования – расчет всплытия пузырьков газа в металлическом расплаве, захват ими включений, которые в этом расплаве присутствуют, и выведение их на поверхность.

В качестве расплава использовали сплав АК120ч с плотностью  $\rho_p = 6450 \text{ кг/м}^3$  и температурой  $T_{\text{сплава}} = 720 \text{ }^\circ\text{C}$ . Для сокращения затрат машинного времени была рассмотрена следующая модельная ситуация. Столб расплава высотой 50 мм и поперечным сечением 20×20 мм с газовой «шапкой» над ним высотой 10 мм (с тем же поперечным сечением). На высоте от основания столба 10 мм на его оси располагали газовый пузырек диаметром 2,4 мм и внутренним давлением 0,145 МПа

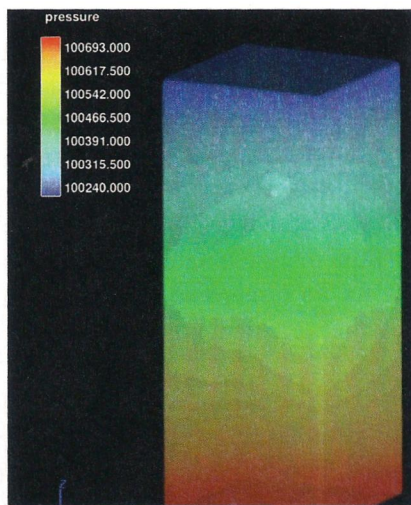




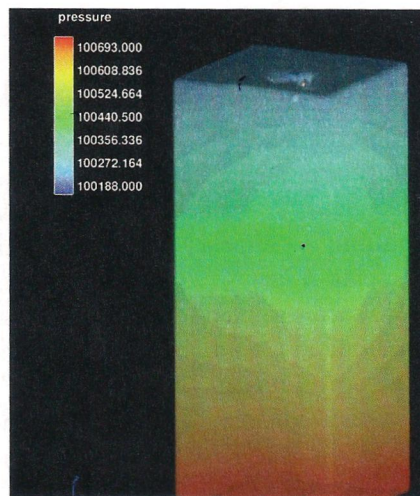
*a*



*б*



*в*



*г*

Результаты моделирования рафинирования сплава алюминия: *a* – газовый пузырек в начале пути; *б* – ассимиляция первой частицы; *в* – ассимиляция второй частицы; *г* – вынос частиц на поверхность сплава

(рисунок, *a*). Диаметр пузырька определяли расчетным путем. На пути всплытия пузырька, т. е. на оси столба расплава на высотах 30 и 35 мм от основания столба, размещали две частицы включения диаметром 1,6 мм. Размер включений приближен к максимальному, что усложняет эвакуацию их из расплава. Перечисленных данных достаточно для описания закономерностей поведения частиц оксидов алюминия в масштабе ковша.

Моделирование процесса проводили в программном комплексе *FLOW-3D*<sup>®</sup> – гидродинамическом пакете общего назначения, который успешно используется для решения различных литейных и металлургических задач. В терминах *FLOW-3D*<sup>®</sup> задачу моделировали в постановке двух жидкостей (металлический расплав и газовая среда) с поверхностью раздела между ними и учетом поверхностного натяжения. При этом расплав считался жид-

костью несжимаемой, а газовая среда, которой моделировали газовую «шапку» и газовый пузырек, считалась жидкостью сжимаемой. Поведение частиц включения в расплаве описывали моделью GMO (General Moving Object – свободного движения твердого тела в потоке) [3], а поверхность раздела расплав – газовая фаза рассчитывали с помощью VOF (volume-of-fluid) метода [4, 5], так как главная цель моделирования не связана с теплопереносом, этой частью реального процесса в моделировании пренебрегали.

Математическую модель процесса составляют следующие уравнения:

течение жидкостей: металлического расплава и газовой среды, описывается системой гидродинамических уравнений Навье–Стокса;

уравнения неразрывности в приближении вязкой жидкости: сжимаемой для газовой фазы и несжимаемой для расплава:



$$\begin{aligned} \rho_i \frac{du_i}{dt} &= -\frac{\partial P_i}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu_i \left( 2 \frac{\partial u_i}{\partial x} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \omega \right) \right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu_i \left( \frac{\partial u_i}{\partial y} + \frac{\partial v_i}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu_i \left( \frac{\partial \omega_i}{\partial x} + \frac{\partial u_i}{\partial z} \right) \right], \\ \rho_i \frac{dv_i}{dt} &= -\frac{\partial P_i}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu_i \left( 2 \frac{\partial v_i}{\partial y} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \omega \right) \right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu_i \left( \frac{\partial v_i}{\partial z} + \frac{\partial \omega_i}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu_i \left( \frac{\partial u_i}{\partial y} + \frac{\partial v_i}{\partial x} \right) \right], \\ \rho_i \frac{d\omega_i}{dt} &= -\frac{\partial P_i}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu_i \left( 2 \frac{\partial \omega_i}{\partial z} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \omega \right) \right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu_i \left( \frac{\partial \omega_i}{\partial x} + \frac{\partial u_i}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu_i \left( \frac{\partial v_i}{\partial z} + \frac{\partial \omega_i}{\partial y} \right) \right] + g \rho_i, \\ \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i u_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_i v_i)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_i \omega_i)}{\partial z} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $u, v, \omega$  – компоненты вектора скорости;  $\rho, \mu$  – соответственно плотность и коэффициент динамической вязкости расплава;  $P$  – давление;  $t$  – время;  $g$  – вектор гравитации;  $i$  – индекс, принимающий значения «р» – расплав и «г» – газ. В уравнениях (1) для несжимаемого расплава принимается  $\rho = \text{const}$ .

Система уравнений (1) дополняется следующими начальными и граничными условиями.

1. Давление в газовой «шапке» и расплаве в начальный момент времени равно атмосферному. Начальное давление в газовом пузырьке  $0,145$  МПа.

2. На внешних сторонах расчетной области – гранях столба расплава с газовой «шапкой» задано условие симметрии.

3. На границах раздела расплав – газовая фаза учитывается поверхностное натяжение в соответствии с формулой Лапласа:

$$p_p = p_r + \sigma(1/r_1 + 1/r_2),$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $r_1$  и  $r_2$  – ортогональные радиусы главных кривизн свободной поверхности.

4. На границах контакта расплава с частицами принимается условие «прилипания», т. е. скорость расплава на твердых стенках частиц равна скорости движения этих частиц.

Результаты моделирования (см. рисунок) показали, что пузырек рафинирующего газа, всплывая, сталкивается с первой и второй частицами оксида алюминия. На нематаллические включения, соприкасающиеся с поверхностью пузырька газа, действуют силы поверхностного натяжения, удерживают их при всплытии и увлекают частицы оксидов за собой (см. рисунок б, в), выводя их на поверхность расплава, где сам пузырек исчезает, переходя в газовую фазу (см. рисунок г).

Таким образом, моделированием в программном комплексе *FLOW-3D* подтверждена рафинирующая способность образующегося в системах  $\text{CaCO}_3\text{-Al}$  и  $\text{SrCO}_3\text{-Al-Si}$  газа.

### Литература

1. Слетова Н. В., Чайкин В. А., Задруцкий С. П. и др. Термодинамическое моделирование химических реакций карбоната кальция в расплаве алюминия // Литейщик России. 2013. № 4.
2. Слетова Н. В., Чайкин В. А., Задруцкий С. П. и др. Термодинамическое моделирование химических реакций карбоната стронция в расплаве алюминия // Литье и металлургия. 2012. № 3. С. 85–88.
3. Бархударов М., Вей Г. Моделирование литейных процессов с изменяемой геометрией // Литейщик России. 2007. № 12. С. 10–15.
4. Hirt C. W., Nichols B. D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries // J. Computational Physics. 1981. Vol. 39. P. 201–225.
5. Волнов И. Н., Нагорный В. С. Моделирование процессов получения монодисперсных капель жидкостей в электрокапеструйных технологиях // Науч.-техн. вед. СПб ГПУ. Наука и образование. 2010. № 4. С. 294–300.