

УДК 621.74

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПУТЁМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА РАСПЛАВ

© 2012 Д. Г. Черников<sup>1</sup>, В. А. Глущенко<sup>1</sup>, А. Ю. Иголкин<sup>1</sup>, К. В. Никитин<sup>2</sup>, С. А. Акишин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П.Королёва (национальный исследовательский университет)

<sup>2</sup>Самарский государственный технический университет

<sup>3</sup>Государственный научно-производственный ракетно-космический центр "ЦСКБ-Прогресс"

Представлены результаты комплексного исследования влияния импульсного магнитного поля высокой напряжённости на процесс кристаллизации, структуру, литейные и механические свойства алюминий-кремниевых сплавов.

*Физический способ обработки расплава, магнитно-импульсная обработка, микроструктура, механические свойства, жидкотекучесть, отливка.*

В настоящее время на предприятиях авиационно-космической отрасли существуют проблемы, связанные с качеством отливок ответственного назначения из алюминиевых сплавов. Сложность технологического процесса и влияние на него многих факторов, а также несовершенство существующих технологий

приводит к появлению литейных дефектов, число которых по разным оценкам составляет несколько десятков.

На рис. 1 показаны наиболее характерные дефекты, возникающие в реальных отливках из алюминиевых сплавов, например, при производстве деталей двигателей летательных аппаратов.

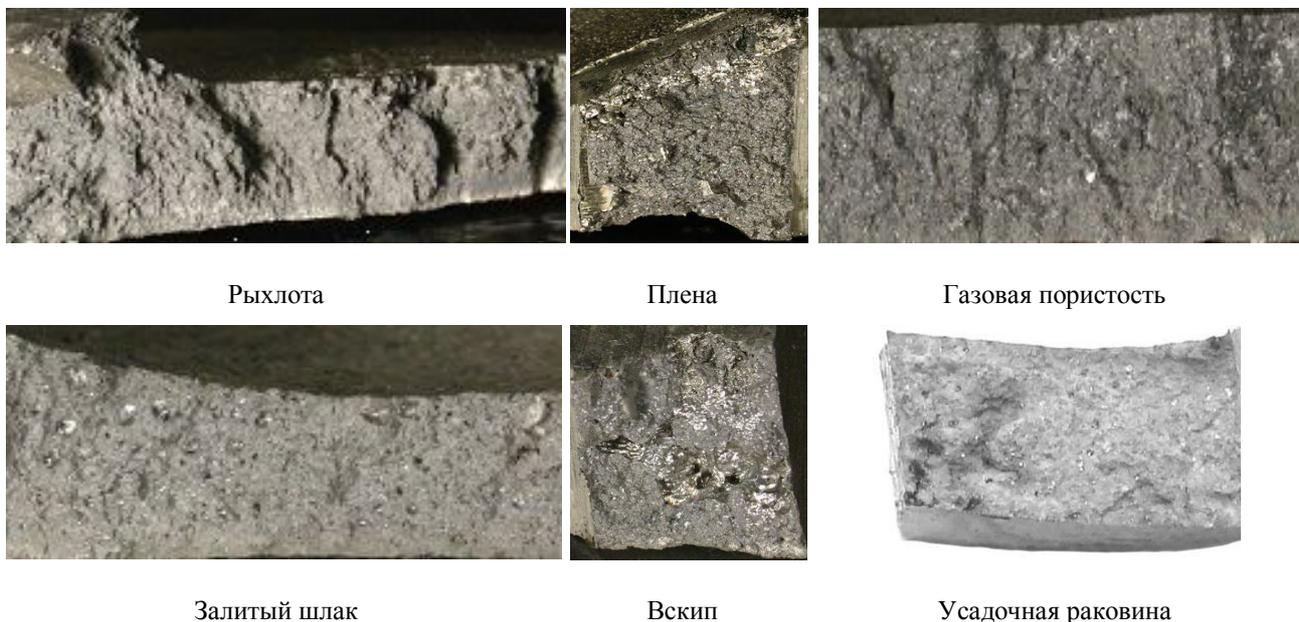


Рис. 1. Характерные дефекты, возникающие в отливках из алюминиевых сплавов

Процент брака литых деталей по статистическим данным ряда профильных предприятий может достигать 40 %. Всё это свидетельствует об актуальности совершенствования технологий литейного производства деталей ответственного назначения.

Одним из эффективных путей решения этих проблем являются активно развивающиеся в последнее время, физические методы обработки расплава, которые обладают существенными преимуществами по сравнению с традиционными технологиями плавки и

литья. Так, физические методы обработки расплавов способствуют получению мелкозернистой структуры и повышенных технико-эксплуатационных свойств отливок. При этом химический состав литейных сплавов не загрязняется нежелательными примесями при дальнейших переплавах.

С этих позиций представляет научный и практический интерес воздействие в процессах плавки и литья на расплавы импульсного магнитного поля (ИМП) высокой напряжённости, получившее широкое распространение в машиностроении при выполнении операций штамповки, сборки, сварки и др. Рассматриваются поля с импульсной мощностью около 1 МВт и длительностью импульса порядка 50 – 200 мкс, при этом напряжённость магнитного поля достигает  $10^5 - 10^7$  А/м. В связи с этим в научно-исследовательской лаборатории «Прогрессивные технологические процессы пластического деформирования» (НИЛ-41) СГАУ появилось новое направление – формирование структуры и свойств литого металла под действием ИМП.

Такая магнитно-импульсная обработка (МИО) расплава обладает рядом существенных преимуществ, например, бесконтактным характером воздействия, возможностью генерации магнитных полей с широким диапазоном значений напряжённости и длительности, высокой точностью и воспроизводимостью параметров.

Суть процесса МИО заключается в преобразовании электрической энергии, накопленной в батарее конденсаторов магнитно-импульсной установки (МИУ), в теплосиловое воздействие на обрабатываемый объект [1].

Исходя из физики процесса, были установлены основные факторы МИО расплава [2]: тепловой (дополнительный разогрев расплава в результате действия вихревых токов) и силовой (распространение волн напряжений и интенсивных металлопотоков по всему объёму расплава в результате действия давления ИМП).

Также разработаны различные технологические схемы, позволяющие обрабатывать расплав как на этапе его

подготовки [3], так и непосредственно в литейной форме [4].

Для изучения механизма такой обработки и управления им были проведены комплексные исследования. Оценка влияния вышеперечисленных факторов МИО расплава осуществлялась с помощью разработанных методик компьютерного моделирования и экспериментальных исследований. Влияние теплового фактора исследовалось с помощью системы компьютерного моделирования литейных процессов «Полигон» и специального измерительного стенда [5]. В результате было установлено, что под действием этого фактора происходит разогрев расплава, достаточный для изменения кинетики его кристаллизации. Оценка влияния силового фактора проводилась с помощью конечно-элементного комплекса ANSYS/LS-DYNA, а также разработанного датчика импульсных давлений [6]. Были получены качественные и количественные данные о распространяющихся по всему объёму расплава волнах напряжений и возникающих интенсивных металлопотоках, которые также значительно изменяют условия кристаллизации расплава.

Кроме этого были проведены многочисленные экспериментальные исследования влияния факторов МИО на структуру, литейные и механические свойства отливок из силуминов, как в лабораторных условиях совместно с Центром литейных технологий СамГТУ, так и в промышленных совместно с «ЦСКБ-ПРОГРЕСС» и ОАО «Кузнецов». Рассматривались бинарные, с различным содержанием кремния, и промышленные алюминиево-кремниевые сплавы. Были получены следующие результаты.

#### *Влияние МИО на литейные свойства.*

Одним из важнейших литейных свойств сплавов является жидкотекучесть. При оценке влияния МИО на это свойство использовалась малая комплексная проба Нехендзи-Купцова. Результаты замеров заполнения U-образного канала, а также расчёта линейной усадки в зависимости от режимов обработки приведены в табл. 1.

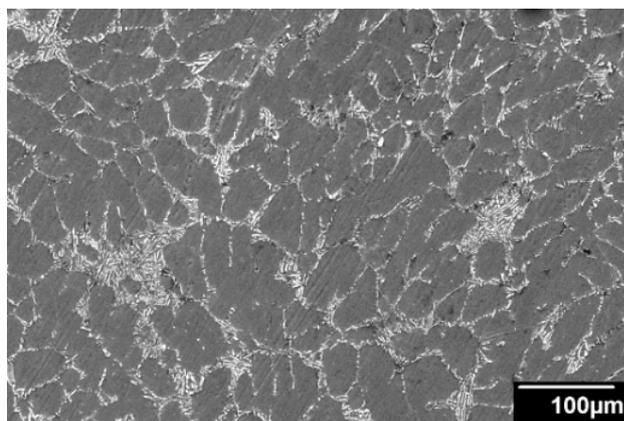
Таблица 1. Влияние параметров МИО на литейные свойства силуминов

| Параметры МИО |       | $\lambda$ , мм | $\varepsilon_{лин}$ , % |
|---------------|-------|----------------|-------------------------|
| W, кДж        | n, шт |                |                         |
| Без обработки |       | 302            | 1,0                     |
| 0,56          | 3     | 362,7          | 0,7                     |

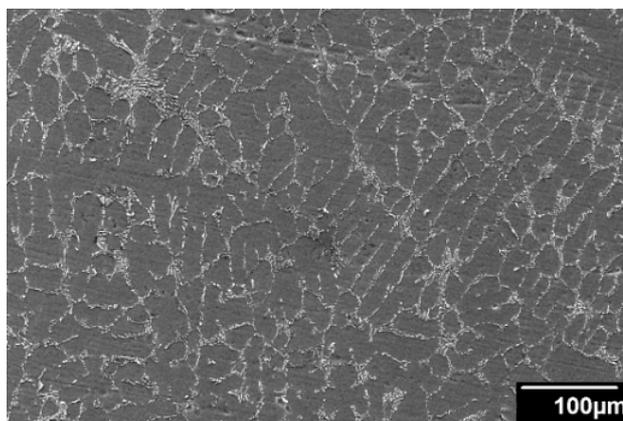
Анализ полученных результатов свидетельствует о повышении

жидкотекучести расплава более чем на 20% при оптимальных параметрах воздействия ИМП, что способствует получению тонкостенных фасонных отливок.

Влияние МИО на структуру силуминов. На рис. 2 показана микроструктура сплава Al-6% Si без обработки и после МИО.

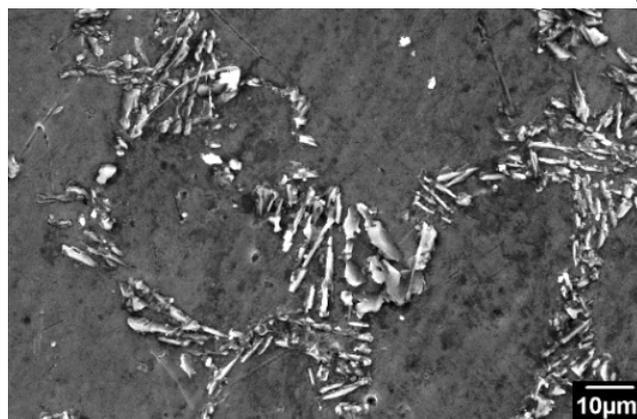


Без обработки

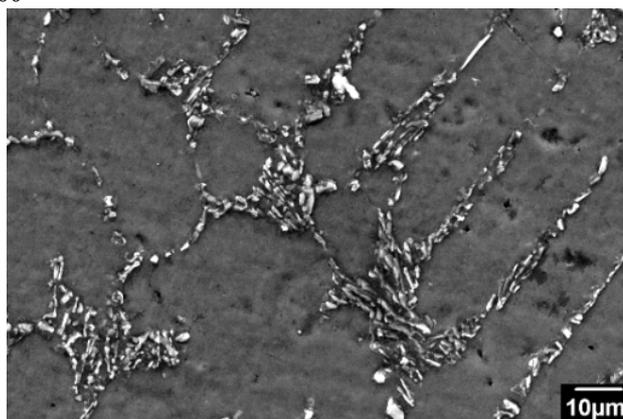


МИО (W=0,56 кДж, n=3 имп.)

× 200



Без обработки



МИО (W=0,56 кДж, n=3 имп.)

× 1000

W – энергия разряда МИУ, n – количество импульсов разряда

Рис. 2. Микроструктура сплава Al-6% Si

Из рисунка видно, что под действием ИМП происходит значительно измельчение зерна, при этом эвтектика на границах зёрен также становится мельче и меняется её морфология – от игольчатого типа к глобулярному.

Влияние МИО на механические свойства силуминов. Положительные структурные изменения благоприятным образом отразились и на механических свойствах, которые определялись на стандартных как вырезанных, так и отдельно отлитых образцах согласно ГОСТ 1583-93.

В результате было установлено, что МИО расплавов приводит к повышению

механических свойств, в среднем предел прочности повышается на 15-20 %, а относительное удлинение в 2-2,5 раза.

Для объяснения модифицирующего эффекта воздействия ИМП высокой напряжённости на структуру и свойства силуминов с позиций современных представлений о строении расплава можно предположить следующее. Распространение интенсивных волн напряжений способствует возможному разрушению самих элементов строения расплава (кластеров) или их микрогруппировок. Такое разрушение приводит к снижению значения критического размера зародышевых центров

кристаллизации. Возникающие металлотокки равномерно распределяют их по всему объёму расплава. Дополнительный разогрев расплава приводит к выравниванию его температуры также по всему объёму, что способствует началу объёмной кристаллизации.

Таким образом, на основании проведённых исследований можно сделать следующие выводы:

1. МИО расплавов силуминов способствует выравниванию однородности свойств по всему объёму, снижает размеры газоусадочной пористости. Обработка расплава в жидком состоянии способствует измельчению эвтектики. Разогрев пограничного слоя расплава вызывает изменение кинетики кристаллизации сплава (появление переохлаждения, повышение температур начала кристаллизации  $\alpha$ -фазы и эвтектики).

2. МИО значительно улучшает литейные свойства силуминов, такие как жидкотекучесть и линейную усадку.

3. Анализ структуры позволил выявить модифицирующее влияние МИО, что выражается в измельчении структурных составляющих и повышении однородности их распределения.

4. Установлено благоприятное влияние параметров МИО на механические свойства сплава.

5. Технология МИО расплава была опробована в промышленных условиях. Проведённая работа показала её гибкость и лёгкость адаптации к существующей технологии литья.

#### Библиографический список

1. Белый, И. В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И.В. Белый, С.М. Фертник, Л.Т. Хищенко. – Харьков: Вища школа. 1970. – 190 с.

2. Черников, Д.Г. О магнитно-импульсной обработке расплава силумина АК9Т[Текст]/ Глущенко В.А., Гречников Ф.В., Иголкин А.Ю., Никитин В.И., Никитин К.В.//Литейное производство. 2011. № 9. С.8-11.

3. Глущенко, В.А. Влияние импульсного магнитного поля высокой напряженности на свойства жидких алюминиевых сплавов [Текст] / В.А. Глущенко, Ф.В. Гречников, В.И. Никитин, Д.Г. Черников, А.Ю. Иголкин, К.В. Никитин, А.А. Поздняков//Литейщик России. 2010. № 7. С. 34-39.

4. Мишуков, А.В. Конструкторские решения применения магнитно-импульсных технологий в литейном производстве[Текст]/А.В. Мишуков, А.Н. Котов, Г.Г. Кривенко, А.А. Ефимов, В.А.Глущенко, Д.Г. Черников, С.А. Акишин//Литейщик России. 2011. № 7. С. 8-11.

5. Глущенко, В.А. Использование СКМ «Полигон» для моделирования дополнительного разогрева расплава металла при магнитно-импульсной обработке[Текст]/В.А. Глущенко, А.Ю. Иголкин, Д.Г. Черников, М.Д. Тихомиров//Вопросы материаловедения № 4 (64), 2010. С. 66-71.

6. Черников, Д.Г. Компьютерное моделирование физических процессов в жидком металле под воздействием импульсных магнитных полей[Текст]/Д.Г. Черников//Металлофизика, механика материалов, наноструктур и процессов деформирования (Металлдеформ-2009): Материалы международной научно-практической конференции. – Самара, 2009. С. 264-270.

## INCREASING PROCESS EFFICIENCY IN THE PRODUCTION OF CASTING PARTS OF AIRCRAFT ENGINES BY THE ACTION OF PULSED MAGNETIC FIELD ON THE MELT

© 2012 D. G. Chernikov<sup>1</sup>, V.A. Glouschenkov<sup>1</sup>, A.Ju. Igolkin<sup>1</sup>, K.V. Nikitin<sup>2</sup>, S.A. Akishin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University  
named after academician S.P. Korolyov (National Research University)

<sup>2</sup>Samara state technical university

<sup>3</sup>Progress state research and production rocket space center

This article presents the results of comprehensive research of the influence of the pulse magnetic field of high intensity on the process of crystallization, structure, foundry and mechanical properties of Al-Si alloy castings.

*Physical methods of action on a melt; pulse-magnetic processing; microstructure, mechanical properties, castability, casting.*

### **Информация об авторах**

**Черников Дмитрий Генадьевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: 4ernikov82@mail.ru. Область научных интересов: магнитно-импульсная обработка материалов, литейное производство.

**Глушечков Владимир Александрович**, кандидат технических наук, профессор, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: vgl@ssau.ru. Область научных интересов: магнитно-импульсная обработка материалов.

**Иголкин Алексей Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: обработка металлов давлением, литейное производство.

**Никитин Константин Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейные и высокоэффективные технологии», Самарский государственный технический университет. Область научных интересов: литейное производство.

**Акишин Сергей Александрович**, главный металлург, Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-ПРОГРЕСС». E-mail: mail@samspace.ru. Область научных интересов: металлургия.

**Chernikov Dmitry Genadyevich**, Candidate of Technical Sciences, Senior Research Officer, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: 4ernikov82@mail.ru. Area of research: pulse-magnetic processing of materials, foundry production.

**Glushchenkov Vladimir Aleksandrovich**, Candidate of Technical Sciences, Professor, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: vgl@ssau.ru. Area of research: pulse-magnetic processing of materials.

**Igolkin Aleksey Juryevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the plastic working of metals department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Area of research: plastic working of metals, foundry production.

**Nikitin Konstantin Vladimirovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the “Foundry and Advanced Processes” department, Samara State Technical University. Area of research: foundry production.

**Akishin Sergey Aleksandrovich**, Chief Metallurgist, Samara Space Centre (TSSKB “Progress”). E-mail: mail@samspace.ru. Area of research: metallurgy.