

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКМ «ПОЛИГОН» ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО РАЗОГРЕВА РАСПЛАВА МЕТАЛЛА ПРИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ

Глушечков В.А., канд. техн. наук, Иголкин А.Ю., канд. техн. наук, Черников Д.Г.  
ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королева»

Абрамов А.А., д-р техн. наук, Тихомиров М.Д., канд. техн. наук  
ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт материалов»

*В статье с использованием системы компьютерного моделирования «Полигон» исследовано воздействие импульсного магнитного поля на жидкий алюминиево-кремниевый сплав. Показано, что в совокупности с силовым воздействием на расплав, магнитно-импульсная обработка приводит к увеличению температуры жидкого металла, что должно учитываться при использовании этого способа модифицирования.*

## Введение

Высокие требования, предъявляемые современной техникой к качеству литых изделий, вызывают необходимость создания эффективных технологий плавления, обработки, разлива и кристаллизации сплавов. Для повышения эффективности литейного производства и улучшения качества литого металла большое значение имеет создание новых методов обработки расплавов.

На сегодняшний день особый интерес вызывают физические (внешние) способы воздействия. Прежде всего, это связано с тем что, физические способы воздействия на жидкий металл вызывают модифицирующий эффект без загрязнения химического состава нежелательными примесями, как в случае с введением модифицирующих добавок.

С недавнего времени авторами разрабатывается новый способ внешнего воздействия на жидкий металл – магнитно-импульсная обработка (МИО) жидкого или кристаллизующегося металла (ЖКМ). Импульсные магнитные поля несколько десятилетий широко используются в машиностроении для деформирования листовых и трубчатых заготовок. Возможность МИО жидкого металла для многих исследователей была проблематичной, так как эффективность магнитно-импульсной обработки падает с возрастанием электросопротивления обрабатываемого материала (твердый металл – металлический расплав). Да и практическая реализация такой обработки существенно затрудняется высокими рабочими температурами. Однако, учитывая отсутствие механического сопротивления жидкого металла, воздействие на него импульсным магнитным полем (ИМП) весьма эффективно при минимальных уровнях энергии разряда.

Для определения влияния МИО на структуру и механические свойства литого металла были проведены экспериментальные исследования. Объектом этих исследований являлись бинарные и промышленные сплавы системы Al-Si. На рисунке 1 показана, например, микроструктура контрольного и обработанного образца из сплава Al-6% Si.

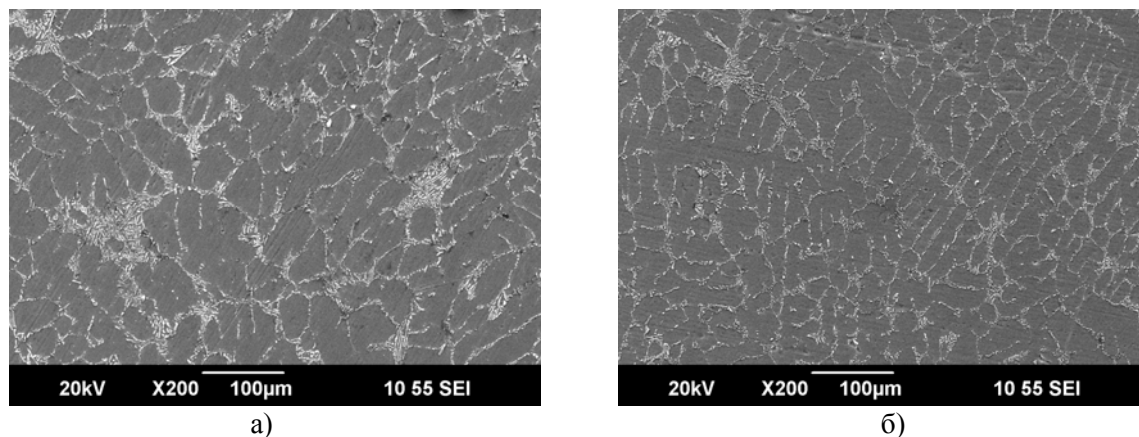


Рисунок 1 – Микроструктура сплава Al-6%Si ( $\times 200$ )  
а) без обработки; б) МИО ( $W=1,26$  кДж,  $n=15$  импульсов).

А рост механических свойств, например, промышленных сплавов после МИО составил: для сплава АК9Т 20% предел прочности и 56% пластичность, а для сплава АК6М – 17% и 140% соответственно.

Такая обработка оказывает комплексное воздействие на металл: термическое и силовое. Основными факторами являются следующие:

- При разряде батареи конденсаторов на индуктор в жидком металле наводятся вихревые токи (рис. 2), величина которых, в зависимости от энергии разряда может составить несколько десятков и даже сотен килоампер. Вихревой ток распределяется в скин-слое ( $\delta$ ) металла неравномерно: на поверхности он максимален, а в глубину затухает по экспоненциальному закону.

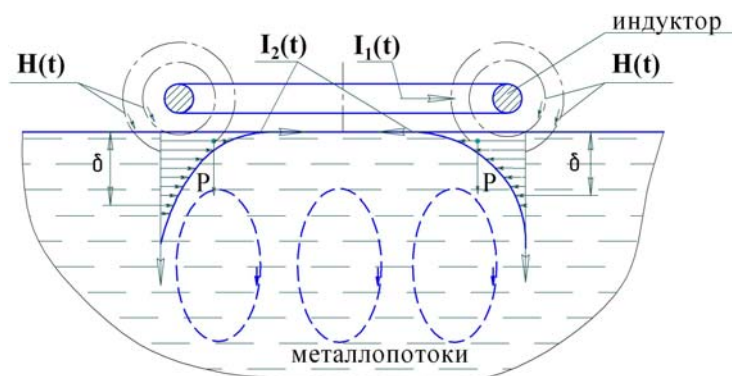


Рисунок 2 – Схема воздействия импульсных магнитных полей на жидкий или кристаллизующий металл

- В результате взаимодействия магнитных полей индуктора и вихревых токов, наведенных в металле, возникают объемные электродинамические усилия отталкивания, носящие пульсирующий характер, соответствующий характеру наведенных токов. Под действием давления ИМП в жидком металле распространяются ударные волны, которые благоприятно воздействуют на процесс уплотнения металла, на его дегазацию, формирование мелкозернистой структуры. Кроме того, возникают металлопотоки, интенсифицирующие и изменяющие процессы теплообмена, кинетику кристаллизации, что также приводит к более мелкозернистой структуре. Направленность металлопотоков в первую очередь зависит от формы и месторасположения индукторных систем.

Для выявления влияния описанных факторов и, в конечном счете, для управления механизмом такого воздействия необходимы системные исследования. Однако, проведение такого рода экспериментальных исследований значительно усложняется высокими рабочими температурами и быстропротекающим характером воздействия. Эффективным средством решения этих вопросов являются численные исследования с применением конечно-элементных комплексов.

Таким образом, целью данной работы являются исследования влияния параметров МИО на величину и характер распределения дополнительного разогрева объема жидкого металла под действием наведенных вихревых токов.

### Методика компьютерного моделирования

Для оценки влияния наведенных под действием ИМП вихревых токов в металлическом расплаве на кинетику его кристаллизации использовалась СКМ ЛП «Полигон». Для численных исследований была рассмотрена радиальная схема воздействия, так как объем расплава, представляющий собой скин-слой, при такой схеме максимален. Кроме того, использовался алюмотермитный тигель, теплопроводность которого составляет 0,15 – 0,3 Вт/мК, в связи с тем, что именно в таких условиях данный фактор МИО может проявиться наиболее полно. Выбрана простая геометрия формы и отливки, представленная на рисунке 3. Это, прежде всего, связано с разумным использованием вычислительных ресурсов.

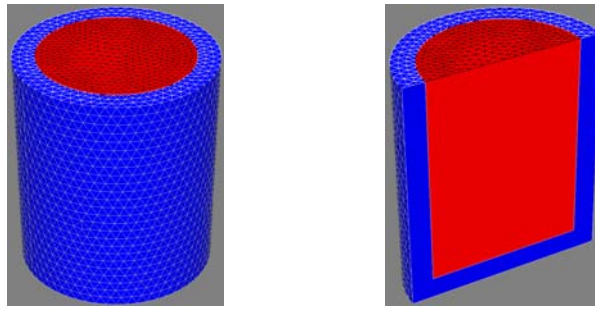


Рисунок 3 – Геометрия формы и отливки

В таблице 1 приведена основная информация по математической модели.

Таблица 1 – Информация по текущим данным математической модели

Информация по текущим данным			
вся геометрия		отливка/форма	
Габарит по X, мм	90	Узлы отливки	9417
Габарит по Y, мм	110	Элементы отливки	45688
Габарит по Z, мм	90	Узлы формы	6887
Узлы/Элементы	13302/71448	Элементы формы	257760

При подготовке геометрической модели отливки учтен объем скин-слоя, показанный на рисунке 4 белым цветом.



Рисунок 4 – Объемы, составляющие математическую модель

Введение это объема необходимо для моделирования скин-слоя, слоя расплава металла, на величину которого проникает магнитное поле. Именно в этом слое наводятся вихревые токи. В данных расчетах его величина, вычисленная по формуле (1) составляет 2,5 и 5 мм.

$$b = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}}, \quad (1)$$

В результате было проведено несколько численных экспериментов, объектом исследования которых являлся литейный промышленный алюминиевый сплав АК9Т, затвердевающий после МИО. Основными варьируемыми величинами являлись:

- величина скин-слоя  $\delta$ : 0 мм (без МИО); 2,5 мм и 5 мм;
- значение силы тока подводимого к скин-слою I: 0 А (без МИО); 25 кА; 50 кА и 90 кА;
- количество импульсов разряда: 0 (без МИО); 1; 3 и 5.

Для решения поставленных задач были приняты следующие допущения. Во-первых, принято, что магнитное поле распределено по объему скин-слоя равномерно, хотя на самом деле его величина убывает по экспоненциальной зависимости от поверхности расплава (рис. 2). Во-вторых, продолжительность действия тока, подведенного к объему скин-слоя за один импульс, составляет 1 секунду, в то время как в реальных условиях вихревые токи действуют порядка  $0,1 \div 0,3$  мс. Данное допущение обусловлено возможностями программы.

Начальные условия в расчетах принимались следующими: температура расплава металла и формы составляла 720°C, температура окружающей среды – 20°C. В СКМ «Полигон» могут быть задействованы разные способы задания внешних электрических потенциалов подводимых к граничным поверхностям отливки. [1] В данном случае выбран способ задания функции тока от времени. Подвод тока осуществлялся при температуре расплава равной 720°C. Временной промежутком между импульсами составлял 5 секунд.

Подвод тока к объему скин-слоя жидкого металла проиллюстрирован, например, графиком, показанным на рисунке 5.

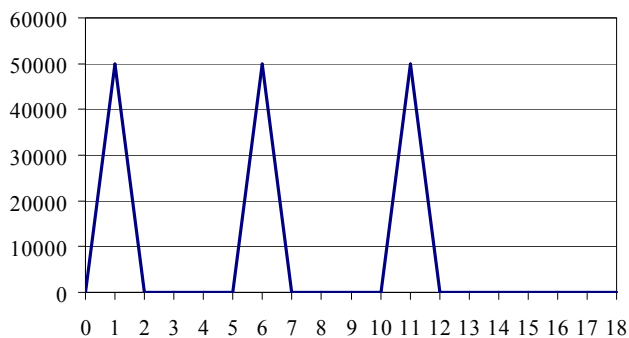


Рисунок 5 – График подвода тока к объему скин-слоя расплава металла

### Результаты компьютерного моделирования

В результате компьютерного моделирования для каждого случая получены картины распределения температурных полей расплава металла. На рисунке 6, для примера, представлены картины распределения температурных полей для случая затвердевания расплава без МИО и после обработки со следующими параметрами: скин-слой – 2,5 мм, сила тока 50 кА, количество импульсов – 5 шт.

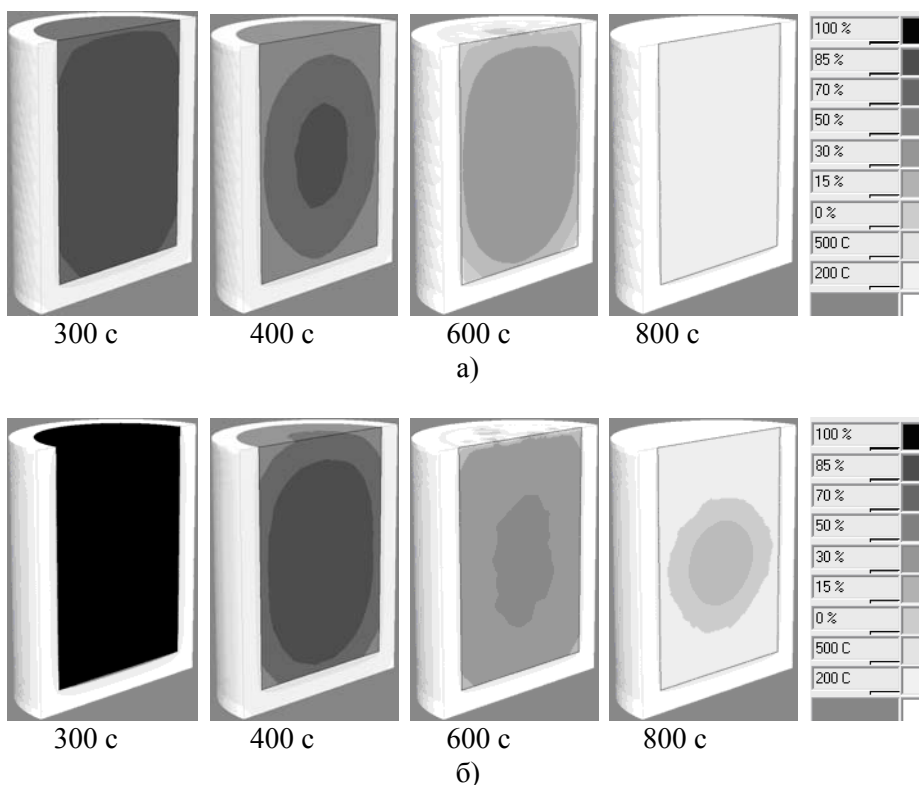


Рисунок 6 – Распределение температурных полей расплава  
а) без МИО; б) МИО ( $\delta=2,5$  мм; 50 кА; 5 имп.)

Результаты компьютерного моделирования представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Дополнительный разогрев расплава металла.

Варьируемые расчетные параметры	Время затвердевания расплава металла (Тл), мин	Максимальная температура в центральной точке отливки, °С	Максимальная температура в промежуточной точке отливки, °С	Максимальная температура в скин-слое, °С
Без воздействия ИМП	12,42	720	720	720
$\delta=2,5$ мм, $I=25$ кА, 1 имп.	12,50	727	727	736
$\delta=2,5$ мм, $I=25$ кА, 3 имп.	12,56	736	736	736
$\delta=2,5$ мм, $I=50$ кА, 1 имп.	13,13	749	753	790
$\delta=2,5$ мм, $I=50$ кА, 3 имп.	13,48	785	785	797
$\delta=2,5$ мм, $I=50$ кА, 5 имп.	14,19	816	825	847
$\delta=2,5$ мм, $I=90$ кА, 1 имп.	14,18	817	837	954
$\delta=2,5$ мм, $I=90$ кА, 3 имп.	15,59	934	944	981
$\delta=5$ мм, $I=25$ кА, 1 имп.	13,05	723	726	732
$\delta=5$ мм, $I=25$ кА, 3 имп.	13,18	742	742	742
$\delta=5$ мм, $I=50$ кА, 1 имп.	13,21	745	748	768
$\delta=5$ мм, $I=50$ кА, 3 имп.	14,28	811	815	835
$\delta=5$ мм, $I=90$ кА, 1 имп.	14,22	810	815	876
$\delta=5$ мм, $I=90$ кА, 3 имп.	17,27	1018	1037	1097

В ходе анализа результатов компьютерного моделирования была получена зависимость дополнительного разогрева расплава металла (средняя температура по всему объему) от параметров магнитно-импульсной обработки: от силы тока, количества импульсов и величины скин-слоя. Данная зависимость показана на рисунке 7.

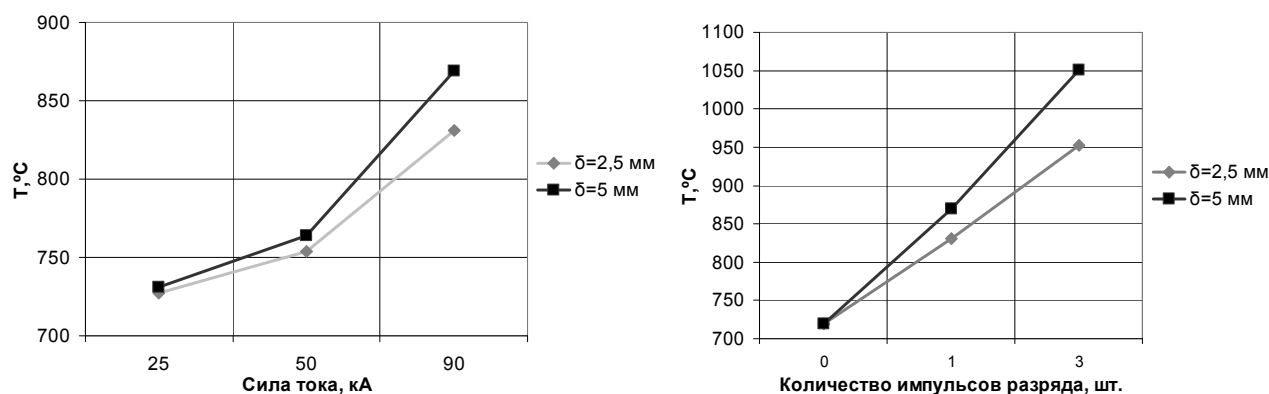


Рисунок 7 – Зависимость температуры дополнительного разогрева расплава от силы тока и количества импульсов разряда

Отношение объемов расплава металла к скин-слою, для значений принятых в данных расчетах, составляет 2,8 и 6,3 соответственно. Полученная зависимость показывает, что величина скин-слоя, как и степень интенсивности обработки, существенным образом влияет на величину дополнительного разогрева и увеличивает время затвердевания расплава.

### Выводы

Безусловно, принятые в расчетах допущения несколько завышают полученные результаты. Это подтверждается сравнительным анализом результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований. Так, например, разница между дополнительным разогревом скин-слоя расплава металла между расчетными и экспериментальными значениями составляет порядка 5°С. Нужно также отметить, что отделить фактор дополнительного разогрева жидкого металла от факторов силового воздействия ИМП в

процессе экспериментов не возможно. Полученные значения в экспериментах являются результатом комплексного воздействия ИМП.

Таким образом, впервые с помощью СКМ «Полигон» была проведена качественная и количественная оценка дополнительного разогрева расплава металла под действием наведенных вихревых токов в процессе магнитно-импульсной обработки. Разработанная методика компьютерного моделирования носит универсальный характер и может быть использована для подобных расчетов различных технологических схем МИО. Исследуемый фактор нагрева металла вносит свою существенную долю в механизм воздействия ИМП на структуру жидкого и твердого металла и в любом случае должен учитываться.

#### **Список литературы**

1. Тихомиров М.Д. Сравнительный обзор наиболее известных систем компьютерного моделирования литейных процессов. Опубликовано в сб. Материалы научно-практического семинара "Новые подходы к подготовке производства в современной литейной промышленности". 17-19 мая 2004 г. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2004. – 118 с.