

УДК 621.74

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

©2011 Д. Г. Черников, В. А. Глуценков, А. Ю. Иголкин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

В данной статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния импульсного магнитного поля высокой напряженности на структуру и свойства алюминий-кремниевых сплавов. На основании результатов исследований предложена и опробована в производственных условиях последовательность проектирования технологических процессов литья с магнитно-импульсной обработкой расплава при производстве деталей двигателей летательных аппаратов.

*Интенсификация литейных процессов, физические способы воздействия на расплав, жидкий и кристаллизующийся металл, модифицирование, магнитно-импульсная обработка, компьютерное моделирование.*

Производство двигателей летательных аппаратов требует постоянного совершенствования технологических процессов для обеспечения растущих требований по качеству и эксплуатационной надежности.

Технологии изготовления деталей, узлов и двигателя в целом во многом определяют его массу, ресурс, трудоемкость и себестоимость.

Снижение массы изделия за счет повышения технико - эксплуатационных свойств литых деталей двигателя летательных аппаратов (ДЛА) является одной из важнейших задач аэрокосмической отрасли. Тем более что масса литых деталей ДЛА от общей его массы составляет порядка 30%.

Согласно принятой в двигателестроении классификации все литые детали двигателей летательных аппаратов делятся на роторные (крыльчатки) и статорные (корпуса и детали общей сборки). Такие детали являются высоконагруженными, ответственного назначения. В связи с этим к ним предъявляются повышенные технические требования с точки зрения качества литого металла [1].

Большая часть номенклатуры литых деталей двигателей ЛА изготавливаются из алюминиевых сплавов системы Al-Si, например АК9ч. Достоинством этих сплавов является повышенная жидкотекучесть, обеспечивающая получение тонкостенных и сложных по конфигурации отливок; повышенная коррозионная стойкость во влажной

и морской атмосферах; сравнительно невысокая линейная усадка; пониженная склонность к образованию горячих трещин [2].

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.

По классификации ГОСТ 19200 – 80 все литейные дефекты разделены на пять групп: 1) несоответствие по геометрии; 2) дефекты поверхности; 3) несплошности в теле отливки; 4) включения; 5) несоответствие по структуре.

На рис. 1 показаны наиболее характерные дефекты, возникающие в реальных отливках из сплава АК9ч при производстве деталей двигателей ЛА.

Также часто встречаются и другие литейные дефекты, такие как неметаллические включения, ликвация и т.д.

Процент брака литых деталей по статистическим данным ряда профильных предприятий может достигать 40 %. Все это свидетельствует об актуальности совершенствования технологий литейного производства деталей ответственного назначения. Решение этой задачи определяет технологический прогресс во всех отраслях машиностроения. Для этого разработан и используется комплекс химических и физических методов воздействия на расплав металла.

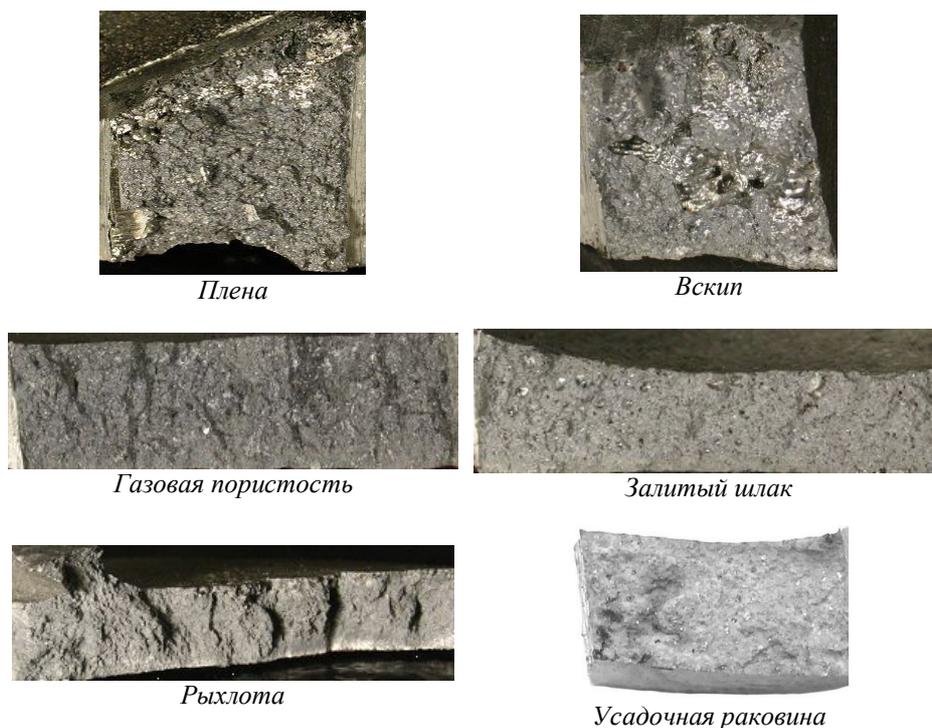


Рис. 1. Характерные дефекты, возникающие в отливках из сплава АК9с

В промышленных технологиях литья алюминиевых сплавов особое внимание уделяется разработке и исследованию различных способов внешнего воздействия на расплавы: таких как механические (перемешивание, фильтрация, продувка газами, обработка вибрацией и ультразвуком), тепловые (термовременная и термоскоростная обработка), барометрические (литье под регулируемым и всесторонним газовым давлением), электромагнитные (обработка электрическим током и электромагнитными полями) и высокоэнергетические (введение в расплав концентрированных источников энергии: электрических импульсов, взрыва). Такие воздействия способствуют получению мелкозернистой структуры и повышенных механических и эксплуатационных свойств отливок без введения специальных модифицирующих добавок.

Особенный интерес в технологиях изготовления алюминиевых сплавов представляет обработка расплава магнитными полями в процессе плавки и литья. Так, наиболее известными являются обработка расплавов в магнитогидродинамических перемешивателях, а также применение электромагнитных кристаллизаторов при непрерывном и полунепрерывном литье слитков. Однако применение способов обработки расплавов магнитным полем при производстве фасонных отливок сдерживается. Это связано со слож-

ностью создания специальных устройств, позволяющих обрабатывать расплавы непосредственно в литейной форме с учетом конфигурации отливки, и недостаточной изученностью процессов, происходящих при кристаллизации расплавов, подвергнутых обработке магнитным полем. Перспективны разработка и исследование эффективных технологий обработки расплавов магнитным полем в предкристаллизационный и кристаллизационный периоды, что дает возможность получать отливки любой конфигурации.

Современное развитие импульсных технологий послужило основанием для проведения научных работ по исследованию воздействия на металлические расплавы импульсного магнитного поля (ИМП) высокой напряженности. Рассматриваются поля с импульсной мощностью около 1 МВт и длительностью импульса порядка 50 – 200 мкс, при этом напряженность магнитного поля достигает  $10^5 - 10^7$  А/м. Подобные ИМП получили широкое распространение в машиностроении при выполнении операций штамповки, сборки, сварки и др. [3]. С этих позиций представляется возможным управление процессом формирования отливок деталей ДЛА с определенным комплексом свойств путем воздействия на расплав ИМП высокой напряженности. Такая магнитно-импульсная обработка (МИО) жидкого или кристалли-

зующегося металла обладает рядом существенных преимуществ, например бесконтактный характер воздействия, возможность генерации магнитных полей с широким диапазоном значений напряженности и длительности, высокая точность и воспроизводимость параметров.

Суть процесса МИО заключается в преобразовании электрической энергии, накопленной в батарее конденсаторов магнитно-импульсной установки (МИУ), в тепло-силовое воздействие на обрабатываемый объект [3].

На основании анализа процессов МИО разработана физическая модель воздействия ИМП высокой напряженности на расплав, которая заключается в следующем. Импульс тока в индукторе формируется за счет разряда через него батареи конденсаторов МИУ, заряжаемой до высокого напряжения, составляющего от тысяч до нескольких десятков тысяч вольт. Такой импульс тока изменяется по закону затухающей синусоиды с длительностью не более одной тысячной доли секунды и частотой от нескольких единиц до десятков килогерц. Протекание импульса тока по индуктору создает вокруг него переменное магнитное поле ( $H(t)$ ), которое индуцирует в жидком металле вихревые токи ( $I_2(t)$ ), имеющие обратное по отношению к току индуктора ( $I_1(t)$ ) направление (рис. 2).

В результате возникают объемные электродинамические силы, величина которых прямо пропорциональна значению тока в проводниках и обратно пропорциональна расстоянию между ними. Глубина проникновения тока в расплав, скин-слой ( $\delta$ ) тем

меньше, чем выше электропроводность материала и частота колебаний разрядного тока.

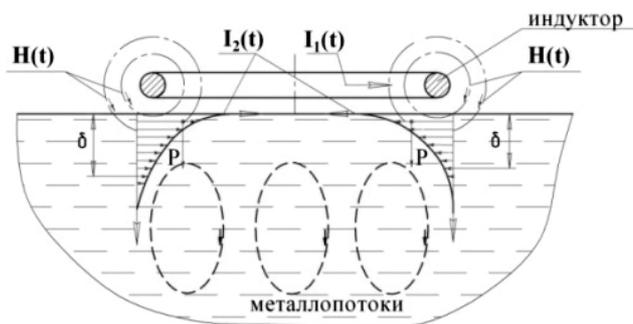


Рис. 2. Схема воздействия ИМП на расплав

Таким образом, на основании физической модели основными факторами воздействия ИМП высокой напряженности являются [4]:

- тепловой – дополнительный разогрев расплава в результате действия вихревых токов;
- силовой – распространение волн напряжений и интенсивных металлопотоков по всему объему расплава в результате действия давления ИМП.

Исходя из физики процесса, были разработаны различные технологические схемы МИО расплава, среди которых три основные:

- радиальное воздействие ИМП на расплав через стенки тигля (рис. 3,а);
- осевое воздействие ИМП на поверхность расплава (рис. 3,б);
- объемное воздействие ИМП с помощью погружного индуктора (рис. 3,в).

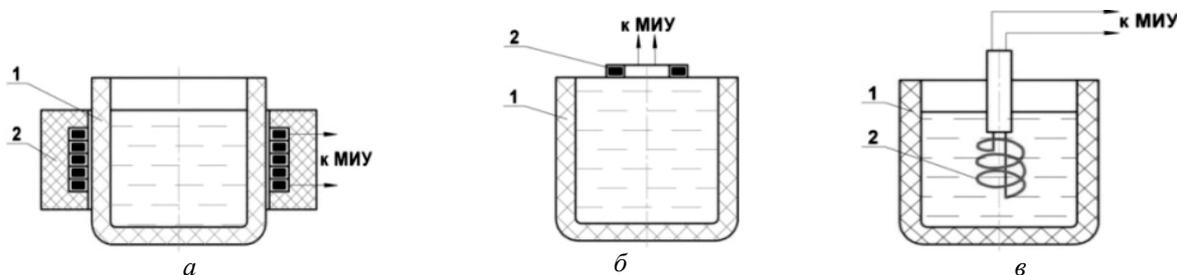


Рис. 3. Основные технологические схемы МИО расплава:  
1 – тигель; 2 – индуктор; МИУ – магнитно-импульсная установка

Возможны различные варианты путем комбинирования основных технологических схем МИО расплавов. Работоспособность индуктора при высоких температурах была обеспечена за счет разработанной конструк-

ции с применением новых материалов в качестве витковой изоляции. Витки индуктора покрываются методом плазменного напыления слоем  $A_2O_3$ , толщина которого составляет порядка 0,3 мм. Проведенные экспери-

ментальные исследования показали ее надежность при напряжении до 5 кВ и температуре 700°C.

Для исследования факторов комплексного воздействия ИМП высокой напряженности на жидкий и кристаллизующийся металл и, в конечном счете, для управления ими необходимы системные исследования. Однако проведение такого рода экспериментов значительно усложняется высокими рабочими температурами и быстропротекающим характером воздействия. Поэтому эффективным средством решения этих вопросов является компьютерное моделирование. Так, для этих целей были разработаны методики компьютерного моделирования с использованием многоцелевого конечно-элементного комплекса ANSYS/LS-DYNA и

системы компьютерного моделирования литейных процессов «ПолигонСофт». Разработанные методики позволяют оценить дополнительный разогрев расплава под действием вихревых токов с учетом величины скин-слоя и распределения давления ИМП на основе экспериментальных данных.

Результаты компьютерного моделирования с применением разработанных методик показаны на рис. 4-7. На рис. 4 в качестве примера показаны картины распределения температурных полей сплава АК9ч без обработки и после МИО со следующими параметрами: скин-слой – 2,5 мм, сила тока 50 кА, количество импульсов – 3 шт. А на рис. 5 – влияние теплового фактора МИО на распределение усадочных полей при его затвердевании.

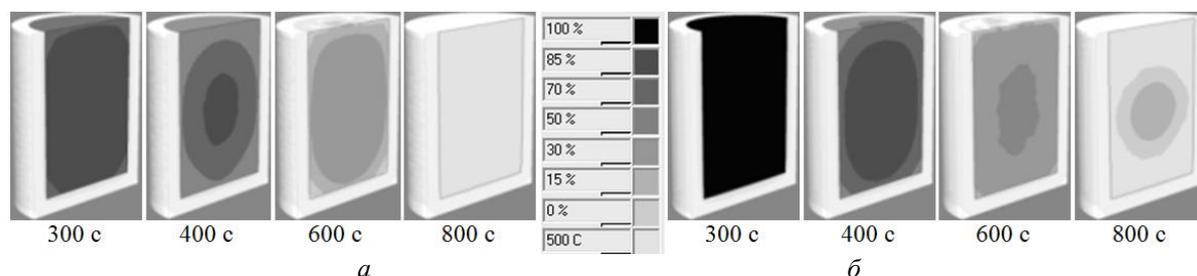


Рис. 4. Распределение температурных полей расплава в процессе его затвердевания: а – без МИО; б – МИО ( $\delta=2,5$  мм,  $I = 50$  кА,  $n = 3$  имп.)

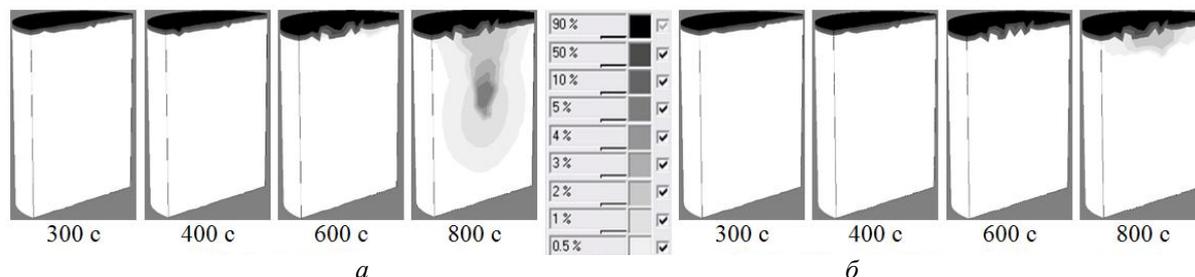


Рис. 5. Распределение усадочных полей при затвердевании расплава: а – без МИО; б – МИО ( $\delta=2,5$  мм,  $I = 50$  кА,  $n = 5$  имп.)

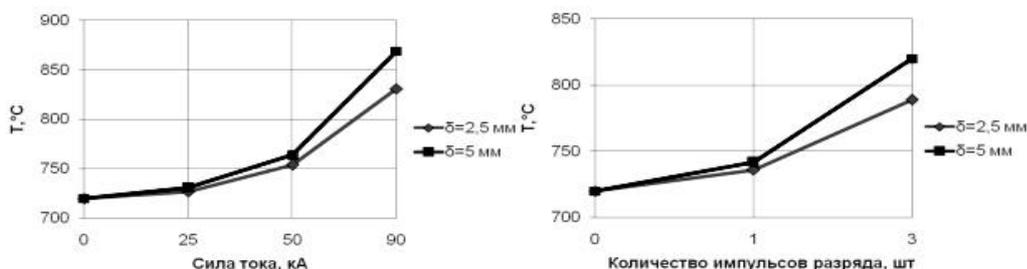


Рис. 6. Зависимость температуры разогрева расплава от параметров МИО

Из приведенных рисунков видно, что величина дополнительного разогрева расплава металла под действием ИМП приводит к существенным изменениям кинетики кри-

сталлизации, что благоприятным образом отражается на значительном снижении величины объемной усадки.

В ходе анализа результатов была получена зависимость дополнительного разогрева расплава (средняя температура по всему объему) от параметров МИО: силы тока, количества импульсов и величины скин-слоя (рис. 6). Результаты компьютерного моделирования показали, что величина скин-слоя, как и степень интенсивности обработки (сила то-

ка), существенным образом влияет на величину дополнительного разогрева, что приводит к увеличению времени затвердевания расплава.

Результаты распространения волн напряжений по всему объему расплава под радиальным магнитно-импульсным воздействием показаны на рис. 7.

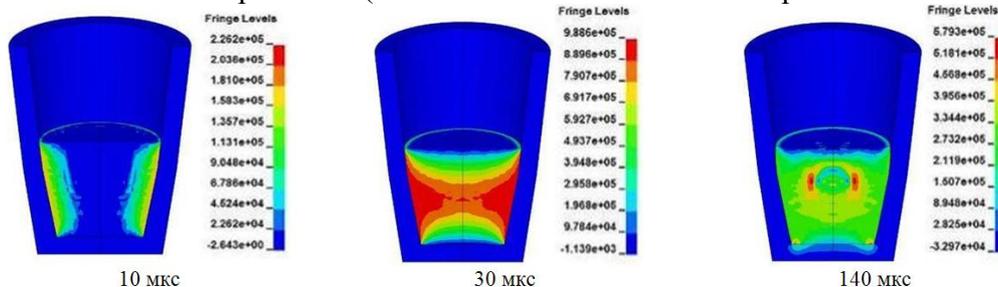


Рис. 7. Распространение ударных волн в расплаве АК9ч под воздействием ИМП

Для экспериментального исследования влияния факторов МИО на кинетику кристаллизации, структуру и свойства сплавов были рассмотрены промышленные сплавы АК9Т, АК6М2. МИО расплавов осуществлялась по радиальной схеме воздействия в экспериментальной технологической оснастке (рис. 8).

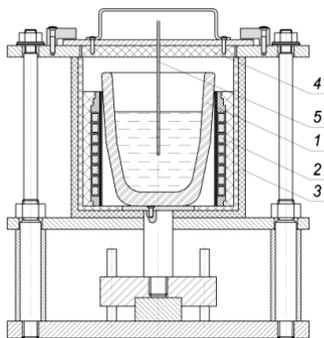


Рис. 8. Оснастка для МИО расплава:

1 – тигель; 2 – индуктор; 3 – тепловая камера; 4 – крышка; 5 – термопара

Для снижения тепловых потерь во время МИО в конструкции оснастки была предусмотрена тепловая камера, в которой расположен многovitковый индуктор. Во избежание выплеска расплава во время обработ-

ки предусмотрена крышка, в которую встроена термопара для контроля его температуры.

Результат анализа полученных кривых охлаждения сплавов без обработки и после показал, что угол наклона между кривой на участке от  $T_{обр}$  до  $T_{лик}$  (жидкое состояние) и осью абсцисс увеличивается пропорционально степени интенсивности МИО. Предположение о дополнительной энергии в скин-слое и результаты компьютерного моделирования дополнительного разогрева расплава под воздействием ИМП подтверждены экспериментально. Обработка расплава при температуре  $720^{\circ}\text{C}$  вызывает дополнительный разогрев расплава, что выражается в увеличении времени его охлаждения до температуры ликвидус ( $T_{лик}$ ) и уменьшении скорости охлаждения жидкой фазы.

Дальнейший анализ кривых охлаждения показал, что при МИО, например, сплава АК9Т температуры образования основных составляющих сплав фаз увеличились (рис. 9).

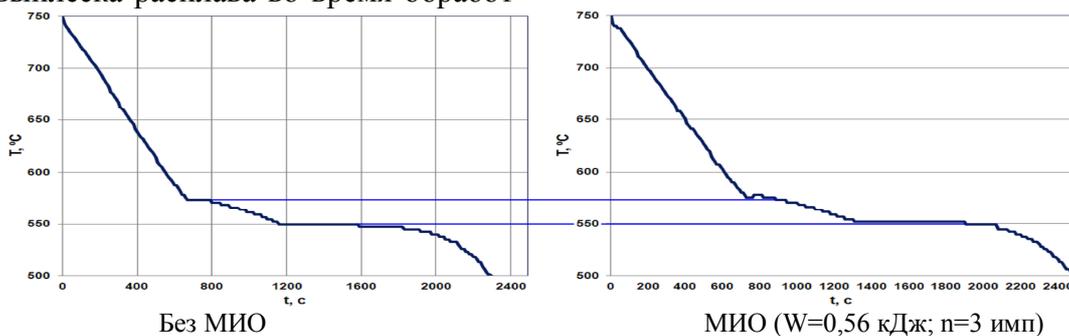


Рис. 9. Кривые охлаждения сплава АК9Т

Кроме того, исследовалось влияние МИО на литейные свойства сплавов. Для определения жидкотекучести сплава АК9Т использовалась малая комплексная проба Нехендзи-Купцова, которая также позволяет определить и линейную усадку. Жидкотекучесть сплава определялась по длине заполнения U-образного канала, а величина линейной усадки по стандартной формуле.

Результаты замеров U-образных прутков и расчетов линейной усадки в зависимости от режимов МИО приведены в табл. 1. Анализ полученных результатов свидетельствует о значительном повышении жидкотекучести и снижении линейной усадки при оптимальных параметрах воздействия ИМП на расплав.

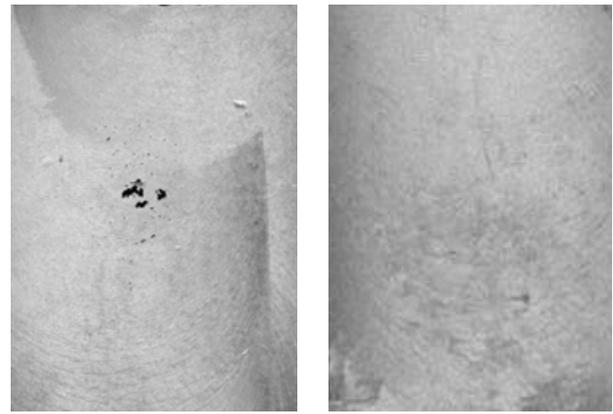
Таблица 1. Влияние параметров МИО на литейные свойства сплава АК9Т

Параметры МИО		Жидкотекучесть $\lambda$ , мм	Линейная усадка $\epsilon_{лин}$ , %
W, кДж	n, шт		
Без обработки		302	1,0
0,56	3	362,7	0,7
1,26	3	323	0,9

Повышение жидкотекучести также подтверждается снижением краевого угла смачиваемости капли расплава, подвергнутого МИО. Улучшение таких важных технологических свойств под действием МИО способствует лучшей формозаполняемости расплавом литейной формы и повышению точности отливок. Появится возможность получать отливки со сложными фасонными полостями, тонкими ребрами и перегородками, что сведет к минимуму последующую механическую обработку.

Помимо этого было исследовано влияние параметров МИО на макро- и микроструктуру сплавов. Установлено, что под воздействием ИМП высокой напряженности на расплавы способствует устранению газоусадочной пористости в центре слитка, измельчению эвтектики и ее видоизменению – переход от игольчатого типа к глобулярному. На рис. 10, например, показана макроструктура слитка из АК9Т без обработки и после МИО.

Результаты механических испытаний образцов показаны в табл. 2. Данные, приведенные в таблице, свидетельствуют о значительном повышении и предела прочности, и относительного удлинения одновременно.



Без обработки МИО (W=1,26 кДж, n=3)  
Рис. 10. Влияние параметров МИО на макроструктуру слитков из АК9Т

Таблица 2. Результаты механических испытаний образцов из АК9Т и АК6М2

Параметры МИО		Механические свойства АК9Т/АК6М2	
W, кДж	n, шт	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %
Без обработки		183/202	1,4/2,2
0,28	3	203/211	2,2/3,2
0,56	3	217/233	3,8/4,0
1,26	3	219/238	3,4/5,3

Для реализации технологии формирования структуры и свойств отливок деталей ответственного назначения под действием ИМП была разработана последовательность ее проектирования на основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований (рис. 11).

Данная методология проектирования технологии МИО жидкого и кристаллизующегося металла была апробирована в производственных условиях на ОАО «Кузнецов» (г. Самара) и реализована на примере получения реальной отливки «Маслота» из сплава АК9ч. В качестве технологической схемы использовалось осевое воздействие ИМП на расплав (на прибыльную часть отливки) непосредственно в металлической форме. Предполагается, что под воздействием ИМП литой металл будет уплотняться и подпитываться в процессе затвердевания, что благоприятным образом отразится на структуре и технико-эксплуатационных свойствах отливки. С этой целью была доработана кокильная форма, в частности, установлена поворотная плита, на которой закреплен индуктор, подключенный к МИУ.

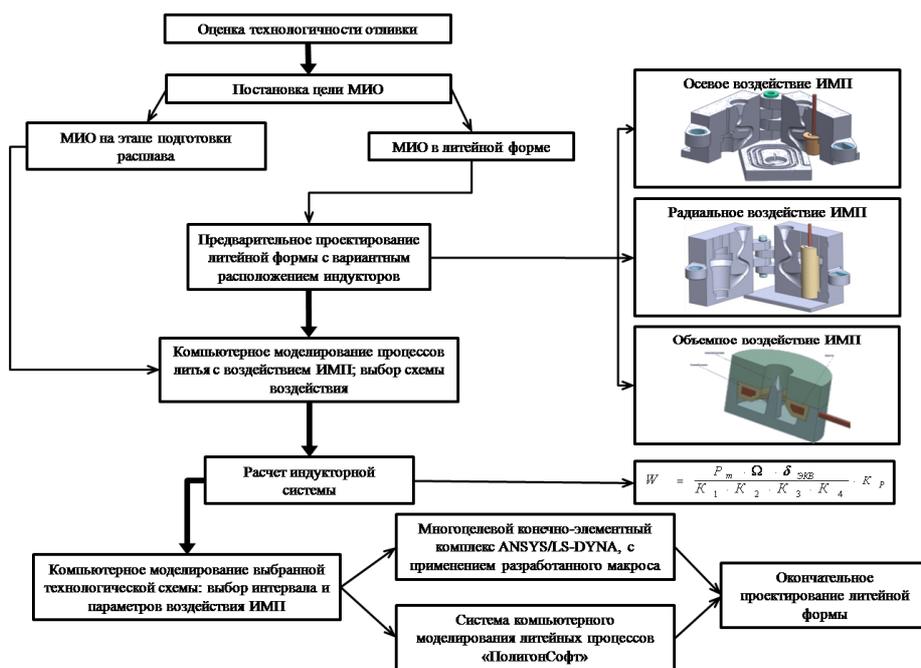


Рис. 11. Последовательность проектирования технологического процесса получения отливок деталей ДЛА с воздействием ИМП высокой напряженности на расплав

Для работоспособности индуктора при высоких рабочих температурах, а также для предотвращения контакта с расплавом установлен защитный экран из магнетопрозрачного жаропрочного материала. Схема собранной в комплекс модернизированной металлической литейной формы показана на рис. 12.

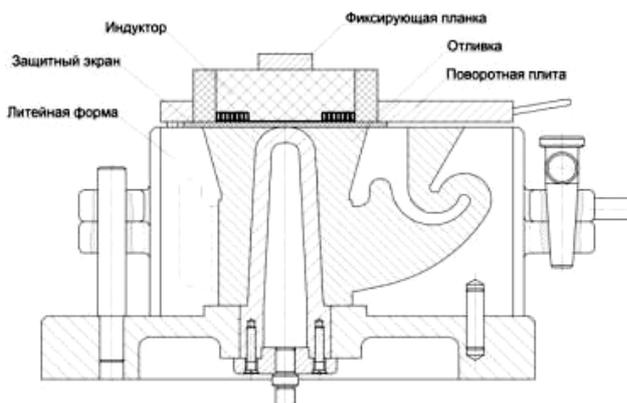


Рис. 12. Модернизированная литейная форма для МИО расплава металла

МИО расплава осуществлялась непосредственно в литейной форме со следующими параметрами: энергия разряда – 1; 1,5; 2 и 2,5 кДж; количество импульсов разряда – 1 и 3. Были проведены одна контрольная и пять опытных плавов.

Отливки подверглись стандартной термообработке. Из основной части отливок

были вырезаны образцы для определения механических свойств (ГОСТ 1583-93), а также темплеты для проведения металлографических исследований.

Микроструктура сплава АК9ч показана на рис. 13. Анализ микроструктуры приведен в табл. 3.

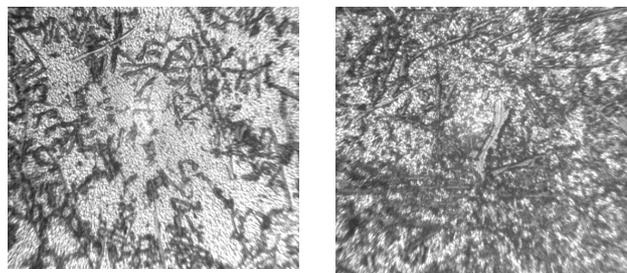


Рис. 13. Микроструктура сплава АК9ч (x86): Без обработки МИО (W=1 кДж, n=3 имп.)

Согласно данным, представленным в табл. 3, МИО расплава в кристаллизационном периоде и непосредственно в металлической литейной форме также способствует измельчению микроструктуры.

По результатам анализа данных механических испытаний были получены зависимости механических свойств от параметров МИО (рис. 14).

Полученные результаты подтверждают благоприятное воздействие МИО на механические свойства литого сплава. Важным мо-

ментом является повышение качества отливки при минимальном уровне энергии разряда и количестве импульсов. Время МИО составляет доли секунды, а минимальные параметры воздействия позволяют существенным образом экономить электроэнергию и повысить ресурс МИУ.

Таблица 3. Параметры  $\alpha$ -Al сплава АК9ч

	Без обработки	МИО (W=1 кДж, n=3 имп.)
Количество частиц, шт	126	275
Среднее значение, мкм	12,2	8,7

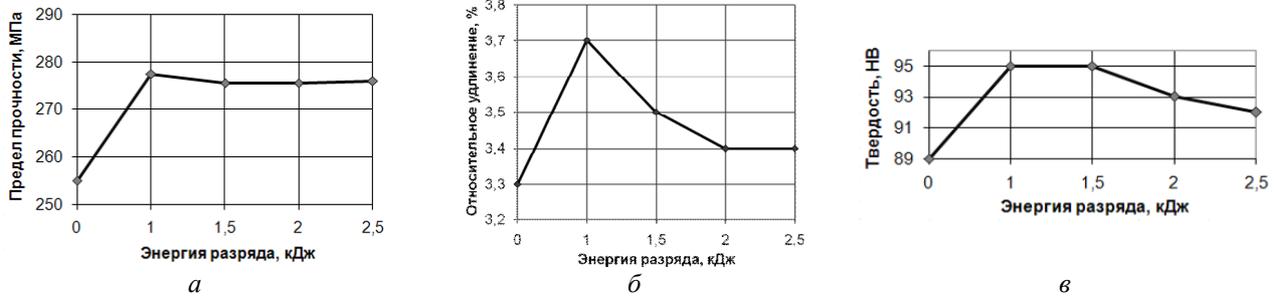


Рис. 14. Зависимости механических свойств от энергии разряда:

а – зависимость предела прочности от энергии разряда; б – зависимость относительного удлинения от энергии разряда; в – зависимость твердости от параметров МИО

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

1. МИО расплавов силуминов способствует выравниванию однородности свойств по всему объему, 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 технологические свойства силуминов, такие как жидкотекучесть и линейную усадку. Так, обработка расплава АК9Т с энергией разряда 0,56 кДж и количеством импульсов равном 3 способствует повышению жидкотекучести на 20 % и снижению величины линейной усадки на 30 %.

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

4. Установлено влияние параметров МИО на механические свойства сплава АК9Т и АК6М2, максимальное значение свойств для сплавов. Так, прирост составил

для: сплава АК9Т - 20 % для  $\sigma_b$  и в 2,7 раза для  $\delta$ ;

– сплава АК6М2 – 17 % для  $\sigma_b$  и 145% для  $\delta$ .

5. Технология МИО была опробована в промышленных условиях, технология МИО расплава – непосредственно в металлической форме. Проведенная работа показала ее гибкость и легкость адаптации к существующей технологии литья.

### Библиографический список

1. Технология производства авиационных газотурбинных двигателей: учеб. пособие для вузов [Текст] / Ю.С. Елисеев, А.Г. Бойцов, В.В. Крымов [и др.] – М.: Машиностроение, 2003. - 512 с.

2. Металловедение алюминия и его сплавов: справочник [Текст] / Н.Н. Буйнов, М.Е. Дриц, И.Н. Луцкая [и др.] - М.: Metallurgy, 1983. - 279 с.

3. Белый, И.В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов [Текст] / И.В. Белый, С.М. Фертик, Л.Т. Хименко. – Харьков: Вища школа. 1970. – 190 с.

4. Влияние импульсного магнитного поля высокой напряженности на свойства жидких алюминиевых сплавов [Текст] / В.А. Глуценков, Ф.В. Гречников, В.И. Никитин [и др.] // Литейщик России. 2010. - № 7. - С. 34-39.

## **ENHANCEMENT OF EFFICIENCY OF CASTING PROCESSES IN PRODUCTION OF PARTS OF AIRCRAFT ENGINES BY WAY OF ACTION OF PULSE-MAGNETIC FIELD ON MELT**

©2011 D. G. Chernikov, V. A. Glouschenkov, A. Ju. Igolkin

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov  
(National Research University)

The results of theoretical and experimental investigations of the influence of the high-intensity pulse-magnetic field on the structure and properties of aluminum-silicon alloys are presented in this paper. Based on the results of the investigations the sequence of designing of technological processes of casting with pulse-magnetic processing of the melt in production of aircraft engine parts has been suggested and sampled industrially.

*Intensification of casting processes; physical methods of action on a melt; liquid and crystallizing metal; modification; pulse-magnetic processing; computer simulation.*

### **Информация об авторах**

**Глушеников Владимир Александрович**, кандидат технических наук, профессор, научный руководитель лаборатории «Прогрессивные технологические процессы пластического деформирования» (НИЛ-41), Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [vgl@ssau.ru](mailto:vgl@ssau.ru). Область научных интересов: прогрессивные технологии, пластическое деформирование.

**Черников Дмитрий Геннадьевич**, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Прогрессивные технологические процессы пластического деформирования» (НИЛ-41), Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [4ernikov82@mail.ru](mailto:4ernikov82@mail.ru). Область научных интересов: прогрессивные технологии, пластическое деформирование.

**Иголкин Алексей Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Обработка металлов давлением», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 335-18-32, (846)267-43-15. Область научных интересов: обработка металлов давлением.

**Glouschenkov Vladimir Aleksandrovich**, Candidate of Technical Sciences, Professor, Research Manager of the “Advanced Technological Processes of Plastic Deforming” Laboratory, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [vgl@ssau.ru](mailto:vgl@ssau.ru). Area of research: Processes of Plastic Deforming.

**Chernikov Dmitry Gennadyevich**, associate research officer of the Research Laboratory “Advanced Technological Processes of Plastic Deforming”, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [4ernikov82@mail.ru](mailto:4ernikov82@mail.ru). Area of research: Processes of Plastic Deforming.

**Igolkin Alexey Jur'evich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of “Plastic Working of Metals” department Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 335-18-32, (846)267-43-15. Area of research: Plastic Working of Metals.