

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ЛУЧЕЙ

На правах рукописи

ПУДАЙЛО Леонид Петрович

УДК 669.715.2: 537.84

ВАКУУИРОВАНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ
В МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Специальность 05.16.04 - Литейное производство

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев - 1993

Диссертация на правах рукописи.

Работа выполнена в Институте проблем литья Академии наук
Украины.

Научные руководители - доктор технических наук, профессор
Полищук Виталий Петрович

доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Дубодолов Виктор Иванович

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Бялик Олег Михайлович

кандидат технических наук
Харченко Владимир Николаевич

Ведущее предприятие - Украинский научно-исследовательский
институт авиационных технологий
г. Киев

Направляю Вам для ознакомления автореферат Пужайло Л.П.
Прошу Вас и сотрудников Вашего учреждения принять участие в за-
седании специализированного ученого совета Д016.20.01 или при-
слать свои отзывы /2 экз., заверенные печатью/ по адресу: 252680,
Киев-142, пр. Варнадского, 84/1, ученому секретарю.

Защита состоится 17 декабря 1993 г. в 14 часов на засе-
дании специализированного совета Института проблем литья АН
Украины в конференц-зале Института.

Автореферат разослан 17 ноября 1993 г.

Ученый секретарь специализированного
совета, кандидат технических наук *Д.Г. Афандиянц*

ЛННБ України ім. В. Стефаника



00802620 (1)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Повышение качества отливок и слитков из алюминиевых сплавов, используемых в изделиях ответственного назначения, в таких областях техники как авиационная, космическая, радиоэлектроника, точное машиностроение, двигателестроение - относится к числу неотложных задач литейного производства. Их успешное решение в значительной степени зависит от совершенствования технологий рафинирования металле, и в первую очередь, вакуумирования алюминиевых сплавов. Это связано с тем, что от эффективности такой обработки зависит конечное содержание в металле водорода и оксидных включений и, соответственно уровень свойств отливок.

Проведенные в стране и за рубежом теоретические и технологические исследования процессов вакуумирования алюминиевых сплавов показали, что перспективы их совершенствования связаны, прежде всего, с интенсификацией процессов тепло- и массопереноса при обработке алюминиевых сплавов в вакууме и использованием для этих целей МГД-техники. Однако, отсутствие эффективного оборудования для теплосилового воздействия на жидкий алюминий в вакууме, недостаточная изученность происходящих при этом массообменных процессов не позволяли в полной мере использовать потенциальные возможности новых технологий.

В связи с этим решение важной задачи улучшения качества алюминиевых отливок и слитков для изделий ответственного назначения на основе создания новых экологически чистых технологических процессов вакуумной обработки алюминиевых сплавов и магнитодинамических установок для их реализации является актуальным и соответствует основным направлениям развития науки и потребностям литейного производства.

Цель работы. Теоретические и экспериментальные исследования процессов массопереноса в жидких сплавах на основе алюминия при наложении на расплав электромагнитных полей и вакуума для создания новых ресурсосберегающих экологически чистых технологий вакуумной обработки металла, обеспечивающих существенное повышение качества отливок и слитков ответственного назначения из алюминиевых сплавов, и разработки специализированных вакуумных МГД-установок магнитодинамического типа для их реализации.

Задачи работ:

- Теоретический анализ процесса вакуумирования алюминиевых сплавов в условиях дополнительных внешних воздействий в МГД-установках, разработка новых технологических схем, макетных и лабораторных вакуумных магнитодинамических установок.

- Математическое моделирование процесса массопереноса пузырьков водорода в металле при наложении на движущийся расплав в вакууме электромагнитных объемных сил /ЭМОС/.

- Теоретическое и экспериментальное исследование течений металла в каналах вакуумных магнитодинамических установок для процессов непрерывной и дискретной обработки алюминиевых сплавов.

- Определение тепловых и гидравлических характеристик МГД-оборудования, необходимого для реализации процесса вакуумирования алюминиевых сплавов в дискретных и непрерывных процессах.

- Установление закономерностей удаления водорода в вакууме в зависимости от технологических параметров и режимов вакуумной и электромагнитной обработки металла. Создание новых методов непрерывного контроля процесса дегазации.

- Изучение влияния вакуумной обработки на качество алюминиевых сплавов в условиях выдержки, дополнительной модифицирующей обработки и последующей периодической и непрерывной разливки металла в литейные формы и кристаллизаторы.

- Исследование взаимодействия алюминиевых сплавов с огнеупорными материалами в вакууме при наложении электромагнитных полей, разработка составов и технологии изготовления футеровки для основных рабочих элементов МГД-установок.

- Разработка ресурсосберегающих экологически чистых технологий вакуумной обработки алюминиевых сплавов при наложении электромагнитных полей на расплав и магнитодинамических установок для их реализации, включая электромагнитную разливку металла по закрытым трубопроводам в литейные формы и кристаллизаторы.

- Оценка влияния новых технологий на качество отливок и слитков ответственного назначения из алюминиевых сплавов.

- Освоение технологий и вакуумных МГД-установок в промышленных условиях, оценка их технико-экономической эффективности.

Научная новизна.

Предложен новый метод управления процессами тепломассопереноса при вакуумной обработке алюминиевых сплавов, основанный на комплексном воздействии на расплав электромагнитных полей и вакуума.

Созданы оригинальные технологические схемы и исследовательские МГД-установки для дискретного МДВ-6А и непрерывного - МДВ-4А вакуумирования.

Разработана математическая модель процесса всплывания пузырьков водорода из движущегося расплава в вакууме в поле ЭОС. Установлено, что интенсивность всплывания пузырьков водорода в жидком металле в условиях наложения на расплав вакуума и электромагнитных объемных сил зависит от скорости движения металла, величины и градиента плотности ЭОС. Показано, что в поле ЭОС процесс всплывания пузырьков ускоряется.

Разработана математическая модель течения металла в каналах и вакуумной камере МГД-установки, предназначенной для непрерывной дегазации алюминиевых сплавов типа МДВ-6А. Расчетом в диапазоне изменения массовой силы $/M/$ от 0 до 425 показано, что с ростом амплитуды массовых сил в каналах установки формируются циркуляционные течения, а в зонах спада массовых сил в горизонтальных каналах МДВ-4А - интенсивные вихри. Впервые обнаружен режим течения, при котором расход через нижний горизонтальный канал равен "0" /режим запирающий/ и установлена описывающая этот режим зависимость $Re = 7,85 \cdot 10^{-2} M$.

Впервые установлено, что величина электрического тока в витках жидкого металла в каналах установок МДВ во время вакуумной обработки обратно пропорциональна скорости дегазации сплава. Это позволило создать новый метод контроля кинетики удаления водорода из алюминиевых сплавов.

Впервые установлено, что величина остаточного давления газов в вакуумной камере обратно пропорциональна величине электромагнитного давления в жидком металле. На этой основе разработан новый метод измерения напора электромагнитных массов.

Установлена зависимость прочностных и эксплуатационных свойств футеровочного огнеупорного материала - вологран - от соотношения входящих в его состав компонентов.

Экспериментально определены закономерности вихревого движения металла в каналах магнитодинамических установок, подтвержденные характером отложений неметаллических включений на стенках каналов вакуумных МГД-установок типа МДВ-6А.

Установлено, что максимальная полнота очистки алюминиевых сплавов от водорода при использовании вакуумных магнитодинамических установок достигается при комплексном воздействии на расплав в рабочей зоне вакуумной МГД-установки переменного электрического

тока / 10^4-10^6 А /, переменного магнитного поля /индукция 0,3 Тл/, электромагнитных объемных сил /3-5 МН/м³/, вихревых структур в зоне спада магнитного поля, а также последующего струйного прохождения расплава через зону наложения вакуума.

Показано, что предварительное вакуумирование повышает эффективность последующего микролегирования сплавов АК9с стронцием и АМ4,5Кd - цирконием и титаном, которое выражается в измельчении и компактизации зерен, повышении пластических свойств сплавов, стабилизации их прочности, пластичности и ударной вязкости.

Практическая ценность работы.

Созданы принципиально новые вакуумные МГД-установки, обеспечивающие регулируемый индукционный нагрев жидких алюминиевых сплавов, управляемый по направлению и интенсивности циркуляции жидкого металла через зону наложения вакуума под действием электромагнитных сил и последующую электромагнитную заливку жидкого алюминиевого сплава в литейные формы и кристаллизаторы по закрытым металлопроводам.

Разработаны и внедрены в промышленности рациональные составы, технология изготовления и эксплуатации огнеупорной футеровки - "вологран" из волокнистых материалов на основе глинозема и кремнезема для каналов и тиглей вакуумных МГД-установок.

Разработан и внедрен в промышленности прибор для определения кинетики дегазации алюминиевых сплавов путем контроля характера изменения величины тока в каналах вакуумной МГД-установки, обусловленной пузырьковым выделением воздуха.

Создана технология вакуумной обработки алюминиевых сплавов в магнитодинамических установках типа МДВ-6А для дискретных литейных процессов.

Разработана и испытана в промышленных условиях вакуумная магнитодинамическая установка МДВ-4А, обеспечивающая непрерывное вакуумирование и разливку в кристаллизатор деформируемых алюминиевых сплавов. Установлены рациональные технологические режимы вакуумирования сплава Д1 с применением указанного оборудования.

Реализация результатов работы.

Технология вакуумной обработки алюминиевых сплавов и вакуумные магнитодинамические установки МДВ-6А прошли опытно-промышленную проверку на ПО "Киевтрактородеталь", КИАПО, внедрены на Уфимском моторостроительном производственном объединении с суммарным экономическим эффектом 53 тыс.руб. /в ценах 1990 года/. В 1993

году указанному предприятию изготовлено и поставлено еще 4 вакуумных МГД-установки. Установка МДВ-4А и технология непрерывного вакуумирования прошли опытно-промышленную проверку на Куйбышевском и Ступинском металлургических заводах.

В соответствии с программой "Электротехника Украины" с 1995 года предусмотрен серийный выпуск гаммы новых модификаций вакуумных МГД-установок Киевским заводом инженерных машин для обеспечения потребности предприятий Украины и создания экспортного потенциала Государства.

Апробация работы и публикации.

Материалы диссертации доложены и обсуждены на 12 всесоюзных, 12 республиканских и 8 международных симпозиумах, конференциях, совещаниях и семинарах, в том числе:

1-й и 2-й Всесоюзной конференции "Применение магнитной гидродинамики в металлургии и литейном производстве" /Киев, 1971 г., 1981 г./, 7-м, 8-м, 9-м и 10-м совещании по магнитной гидродинамике /Рига, 1972; 1975; 1978; 1981 гг./, Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение технического уровня и эффективности литейного производства" /Харьков, 1978 г./, международном симпозиуме по гидродинамике жидких металлов /Рига, 1988 г./, научно-техническом семинаре "Прогрессивная технология и оборудование для литейного производства" /Рига, 1989 г./, международной конференции "МГД-процессы - защите окружающей среды" /Киев, 1992 г./, международном семинаре Европейской экономической комиссии ООН: Новые материалы и их применение в машиностроении /Киев, 1992 г./.

По теме диссертации опубликовано 40 статей, получено 8 патентов на изобретения. /США, Канада, Франция, ФРГ, Чехословакия, Швеция, Швейцария и Япония/ и 40 авторских свидетельств на изобретения.

На защиту выносятся:

- новые технологические схемы вакуумных МГД-установок магнитодинамического типа, макетные и лабораторные образцы такого оборудования;
- методы исследования и результаты изучения их электромагнитных тепловых и гидравлических характеристик;
- оригинальные методики измерения напора магнитодинамических установок по принципу компрессии воздействия на жидкий металл вакуума электромагнитным давлением и уравновешивания напора пневма-

тическим давлением с определением момента компенсации по началу изменения электрического тока в канале установки;

- математическая модель и результаты исследования на ее основе движения пузырьков водорода в алюминиевых сплавах в поле объемных электромагнитных сил;

- математическая модель и результаты расчета движения жидкого металла в каналах МД-установок магнитодинамического типа для непрерывного вакуумирования алюминиевых сплавов;

- результаты изучения на натуральных МД-установках течения жидкого алюминия в каналах магнитодинамических установок;

- методика и температура контроля кинетики процесса дегазации алюминиевых сплавов в вакуумных магнитодинамических установках МДВ-6А и индукционных канальных печах по изменению тока в витке жидкого металла;

- результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса удаления водорода при воздействии на управляемый поток жидкого алюминиевого сплава вакуума и объемных электромагнитных сил;

- огнеупорный материал - вологран;

- состав, технологии изготовления и эксплуатации футеровок из вологран;

- технология вакуумирования и электромагнитной разливки алюминиевых сплавов магнитодинамическими установками, для дискретных литейных и непрерывных металлургических процессов, включающая режимы дегазации и результаты рафинирующей обработки металла, а также вакуумные магнитодинамические установки МДВ-6А и МДВ-4А для их реализации;

- режимы и результаты комплексной обработки алюминиевых сплавов в магнитодинамических установках вакуумом и микролегирующими добавками;

- результаты опытно-промышленных испытаний вакуумных магнитодинамических установок и технологий дегазации литейных и деформируемых алюминиевых сплавов, оценки качества металла, отливок и слитков;

- результаты внедрения разработанных технологий вакуумной обработки алюминиевых сплавов и магнитодинамических установок для их реализации.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка

использованных источников из 165 наименований и приложения.

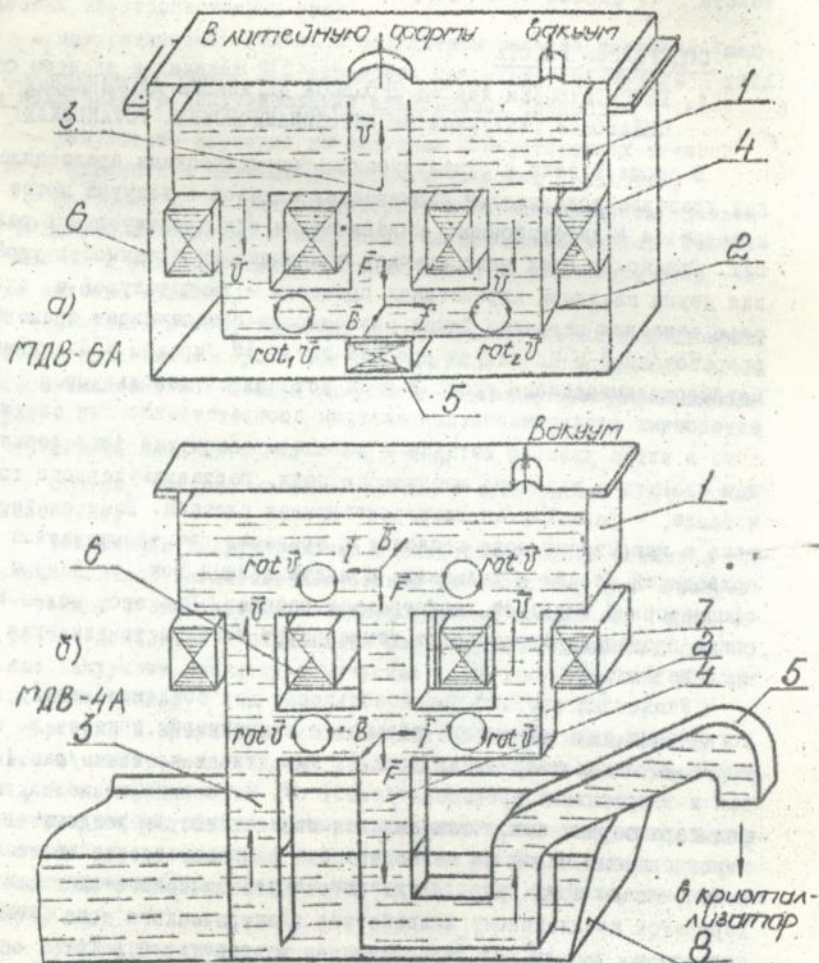
Диссертационная работа содержит 172 страницы машинописного текста 19 таблиц и 72 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ДЕГАЗАЦИИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ВАКУУМНЫХ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

В соответствии с существующими теоретическими представлениями удаление водорода из алюминиевых сплавов в вакууме может производиться в диффузионном, кинетическом или промехоточных режимах. Однако во всех этих случаях возникает необходимость управления двумя главными параметрами процесса - температурой и скоростью движения металла. Такие возможности обеспечивает применение разработанной в Институте проблем литья АН Украины «ГД-техники магнитодинамического типа. В этих установках используются две автономных электромагнитных системы соответственно для создания тока в витке жидкого металла в канале - замкнутая трансформаторная система и внешнего магнитного поля, перпендикулярного току в металле, - разомкнутая электромагнитная система. Взаимодействие тока и магнитного поля приводит к созданию электромагнитной силы, приводящей металл в движение, а индукционный ток, созданный трансформаторной системой, подогревает расплав. При этом можно в широких пределах регулировать температуру и скорость движения жидкого металла.

Указанный принцип был использован для создания новых технологических схем вакуумной обработки алюминиевых сплавов в магнитодинамических установках /рис. 1/ как для дискретных /рис. 1 а /, так и непрерывных процессов /рис. 1 б/. Их анализ позволил выявить ряд характерных зон, отличающихся интенсивностью воздействия электромагнитных полей на металлический расплав. Особое место занимает рабочая зона /р.з./, где поток металлического расплава подвергается комплексному воздействию электрического тока большой плотности, до 10^6 А/м², магнитного поля /до 0,3 Тл/, об.мных электромагнитных сил /ЭМОС/ до 5 МН/м³. Кроме того, на границе рабочей зоны, вследствие растекания тока и спада магнитного поля, возникают устойчивые вихревые течения, а в каналах магнитодинамических установок, наряду с транзитными потоками, возникают электровихревые течения. В результате обеспечиваются благоприятные условия для удаления водорода преимущественно в промежуточном и кинетическом режимах.



- а/ дискретное вакуумирование;
 б/ непрерывное вакуумирование.
 \bar{I} - электрический ток, \bar{B} - магнитное поле, \bar{F} - электромагнитные силы; \bar{U} - транзитное движение металла и
 $rot \bar{U}$ - вихревое движение металла.
 а/ 1 - канал; 2 - канал; 3 - металл; 4 - индуктор;
 5 - электромагнит; 6 - вакуумная камера;
 б/ 1 - приемная емкость; 2 - канал; 3 - сборный трубопровод;
 4 - сливной трубопровод; 5 - сливной трубопровод;
 6 - индуктор; 7 - электромагнит; 8 - кристаллизатор.

Рис. 1.

Проведенный теоретический анализ движения пузырьков водорода в рабочей зоне магнитодинамической установки с применением численных методов показал, что гидродинамическая структура такой зоны весьма сложна, однако для приближенного анализа она может быть представлена модельной структурой, показанной на рис.2. Это замкнутый эллипсоидный вихрь, обтекаемый поверху тонким слоем жидкости со свободной вакуумируемой границей. Этот поток имеет первоначально прямолинейную форму, а затем спадает в вертикальный канал тройниковой зоны. Штриховой линией показано распределение ЭМОС, максимальная плотность которых составляла 5 МН/м^3 , а спад плотности ЭМОС принимался линейным с градиентом 100 МН/м^4 .

Движение пузырьков в области прямолинейного потока жидкого металла определялось численным решением системы: уравнений движения пузырьков с учетом инерционных сил, силы сопротивления, присоединенной массы, силы тяжести, градиентов давления в жидкости и уравнений, учитывающих изменение размеров сферического пузырька /уравнения Рэлея/, сил поверхностного натяжения и вязких сил. Принималось, что в начальный момент пузырек находится в равновесии с жидкостью, процесс его роста - изотермический и отсутствует поступление газа из жидкости в пузырек. Тогда имеем:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{F_0}{1 + \rho/2\rho_1} \frac{1}{R} \left(\frac{dx}{dt} - u \right);$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F_0}{1 + \rho/2\rho_1} \frac{1}{R} \frac{dx}{dt} + \frac{g(\rho/\rho_1 - 1) - f_c/\rho}{1 + \rho/2\rho_1}; \quad (1)$$

$$\frac{d^2R}{dt^2} = \frac{3}{2} \frac{1}{R} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 - \frac{4\gamma}{dt} \frac{dR}{dt} - \frac{5}{\rho R^2} + \frac{0,25}{R} |u - u_1| +$$

$$+ \frac{1}{\rho R} \left\{ [\rho_0 + \rho g(h_0 - x_0)] \frac{R_0}{R} - [\rho_0 + (g\rho - f_c)(h_0 - x)] \right\} \quad (2)$$

Здесь $F_0 = 3/8 C_d (\rho/\rho_1)(u - u_1)$; t - время, с; u и u_1 - скорости движения жидкости и пузырька, м/с; x и x_0 - координаты /текущие/ пузырька, x_0 - начальная ордината пузырька, R_0 и R - начальное и текущее значение радиуса пузырька, м; γ - кинематическая вязкость, Па·с; σ - коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; ρ и ρ_1 - плотности жидкости и пузырька, кг/м³; ρ_0 - давление над свободной поверхностью, Н/м²; высота слоя жидкого металла, м; f_c - плотность ЭМОС, вектор которой совпадает по направлению с вектором ускорения свободного падения 4Н/м^2 ; C_d - коэффициент гидравлического сопротивления

Гидродинамическая структура рабочей зоны
ЧДВ установки

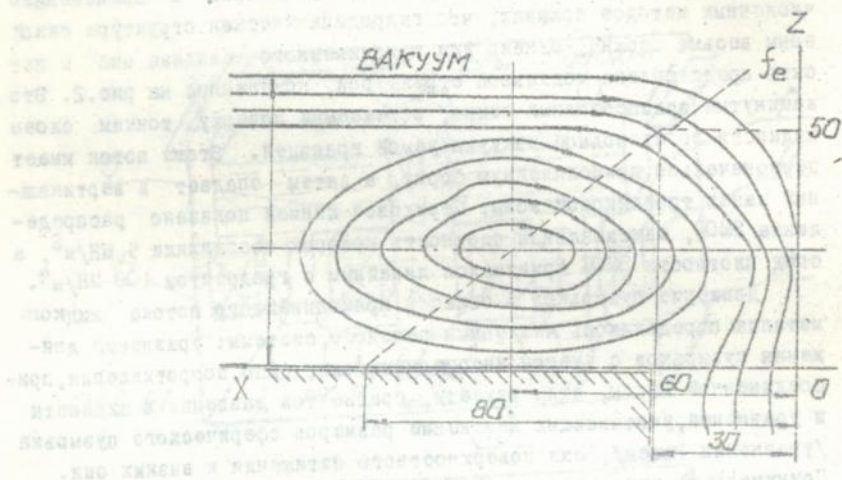


Рис. 2.

Траектории движения пузырьков водорода в
рабочей зоне ЧДВ установки

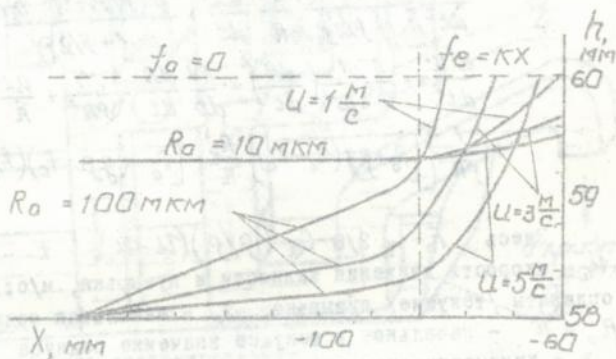


Рис. 3.

пузырька, который принимался равным коэффициенту гидравлического сопротивления твердой сферической частицы с радиусом Ca .

На рис. 3 показаны траектории движения пузырьков с начальными радиусами 10 мкм и 100 мкм, которые всплывают с глубины 2 мм при остаточном давлении 262 Н/м^2 и плотности ЭМОС 5 Нд/м^3 , причем всплытие практически определяется участком движения в зоне действия ЭМОС. Всплытие пузырьков радиусом $R = 10$ мкм с глубины 0,3 мм на свободную поверхность наблюдается только при скорости металла менее 1 м/с.

Расчеты показали, что пузырьки размером 100 мкм движутся по восходящей траектории и могут быть выведены из вихревого потока при наличии ЭМОС. В то же время пузырьки размером 10 мкм захватываются потоком и движутся, практически повторяя линии тока по очень слабо расходящейся /или сходящейся/ траектории, несмотря на воздействие ЭМОС. В ходе расчетов было также установлено, что пузырьки, начальный размер которых близок к 1 мм, зарождающиеся вне зоны действия ЭМОС и при дальнейшем движении попадающие в эту зону, могут схлопываться, т.е. вести себя подобно кавитационным.

2. РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНЫХ ВАКУУМНЫХ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

В соответствии с предложенными технологическими схемами /Рис. 1, а и б/ были рассчитаны, спроектированы и изготовлены лабораторные вакуумные магнитодинамические установки для рафинирования алюминиевых сплавов дискретного МДВ-6А и непрерывного МДВ-4А действия.

Необходимость создания двух различных типов оборудования была обусловлена спецификой литейных и металлургических процессов. Так если в первом случае имеет место четкое чередование цикла вакуумирования и последующей порционной подачи доз алюминиевого сплава в литейную форму, то во втором - операции вакуумирования и подачи жидкого алюминия в кристаллизатор машин непрерывной разливки металла совмещены во времени, что существенно усложняет процесс обработки расплава.

Конструктивно литейная лабораторная вакуумная магнитодинамическая установка для дискретных процессов МДВ-6А создавалась на основе принципиальной схемы /Рис. 1 а/ и состояла из тигля, состыкованного с ним Π - образного полого футерованного канала, металлопровода, 2-х индукторов, входящих в окна канала, а также электромагнита, охватывающего полюсами зону пересечения и порти-

кального и горизонтального участка канала. Установка размещалась в герметичной камере, сообщенной с вакуумной системой.

Для запуска МДВ-6А в работу в ее тигель и каналы заливалось "болото" из жидкого алюминия. При включении индукторов в жидком литке металла в тигле и каналах установки индуцировался ток, обеспечивающий регулируемый нагрев металла. Дополнительное включение электромагнита создавало в его межполюсном пространстве внешнее магнитное поле. Взаимодействие электрического тока в жидком металле и внешнего магнитного поля обуславливало возникновение электромагнитной силы, приводящей металл в управляемое движение. Создание разрежения в вакуумной камере /до 1 мм рт.столба/ позволяло интенсифицировать процессы удаления водорода из жидкого алюминия и предотвращать окисление расплава. Установка МДВ-6А обеспечивала многократное перемещение находящегося в тигле расплава через границу раздела металл-вакуум, а после обработки - заливку его по металлопроводу в литейную форму.

Проведенные исследования электротехнических, гидравлических и тепловых характеристик МДВ-6А позволили установить, что при изменении мощности индуктора в пределах /2-12 кВт/, электромагнита /10-40 кВА/, индукции - /0,05-0,3 Тл/, напорные характеристики установки изменились в пределах /0,1-0,5 МПа/, а расходные - /0,5-3 кг/с/. В результате обеспечивалась возможность применения МДВ-6А для исследования процесса вакуумирования алюминиевых сплавов. Максимальное значение температуры жидкого алюминия составляло 900 ± 10 °С, однако при этом температура различных узлов МДВ-6А не превышала 180°С, что позволило исключить применение водяного охлаждения.

Конструкция вакуумной магнитодинамической установки непрерывного действия /МДВ-4А/, основывалась на принципиальной схеме /Рис.1 б/ и состояла из приемной емкости, соединенной с Ш -образным полым футерованным каналом, боковой патрубком которого сообщался с заборным трубопроводом, а центральный - со сливным трубопроводом, причем последний соединялся с заливочным металлопроводом. В окна канала входили индуктора, а участки стыковки центрального патрубка Ш -образного канала с приемной емкостью и сливным трубопроводом размещались в зазоре полюсов электромагнита. Верхняя часть приемной емкости герметизировалась крышкой и сообщалась с вакуумной системой. При заполнении приемной емкости и каналов жидким алюминием включались индуктора, что обеспечивало созда-

ние в жидком металле в приемной емкости и каналах электрического тока, обеспечивающего регулируемый подогрев металла. Дополнительное включение электрос агнита приводило к возникновению электромагнитной силы, направленной противоположно силам разрежения. При этом расплав под действием разрежения по заборному трубопроводу из миксера поступал в приемную емкость, а из нее действием электромагнитных сил по сливному трубопроводу и заливочному металлопроводу передавался в кристаллизатор установки непрерывной разливки металла. Такое технологическое решение позволило производить вакуумирование жидкого алюминия в процессе его непрерывного движения через вакуумную камеру, а компенсацию столба алюминия производить действием электромагнитных сил.

Проведены исследования состава, теплофизических и физико-химических свойств нового огнеупорного материала на основе каолинового волокна и огнеупорного цемента - "волограна". Установлены рациональные соотношения входящих в его состав компонентов и разработана технология изготовления футеровки рабочих элементов вакуумных магнитодинамических установок, стойкая в среде жидкого алюминия.

Исследования электрических, гидравлических и тепловых характеристик МДВ-4А показали, что при подведенной мощности индукторов в пределах /17-19 кВт/, электромагнита - /60-72 кВт/, при индукции в зазоре электромагнита /0,1-0,25 Тл/, напор установки изменялся в пределах /0,1-0,85 МПа/, расход - /0,30-2,0 кг/с/. Максимальная температура жидкого алюминия в приемной емкости составляла 900 ± 10 °С, а максимальная температура ряда узлов установки превышала 250 ± 10 °С, что потребовало их водяного охлаждения. Проведенные эксперименты подтвердили возможность использования лабораторной установки МДВ-4А для отработки процессов непрерывного вакуумирования и разливки алюминиевых сплавов.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОГО АЛЮМИНИЯ В КАНАЛАХ ВАКУУМНЫХ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Для разработки методов интенсификации массообменных процессов при дискретном и непрерывном вакуумировании жидкого алюминия в магнитодинамических установках МДВ-6А и МДВ-4А были проведены исследования течения металла в их каналах при различных режимах включения электромагнитных систем.

Изучение циркуляции расплава в каналах МДВ-6А производилось на натурной установке. Локальные значения напора жидкого алюминия измерялись трубками Пито с компенсацией напора пневматически

давлением. При этом момент компенсации фиксировался двумя методами: появлением первого пузырька газа на поверхности жидкого металла; началом уменьшения величины электрического тока, проходящего по жидкому металлу в канале при неизменном напряжении на индукторах установки. Полученные результаты изменения давления по высоте канала свидетельствуют о вихревом режиме движения в нем металла как при включении одного, так и двух индукторов установки. Это объясняет причину существенной интенсификации массобмена и геометрии отложений неметаллических включений на стенках каналов.

Изучение движения металла в установке непрерывного вакуумирования /МДВ-4А/ производилось методами численного моделирования для принципиальной схемы реализации процесса вакуумирования приведенной на рис. 1 б.

Решение уравнений Навье-Стокса и непрерывности производилось для условий, когда вертикальные границы области и внутренние границы предполагаются твердыми. Внешняя горизонтальная граница - свободная, недеформируемая. Контролируемыми параметрами задачи при фиксированном распределении массовых сил являются амплитуда массовой силы, определяемая безразмерным параметром - M , и гидравлическое сопротивление внешнего контура, т.е. задано число Рейнольдса через расход жидкого металла во входном и выходном каналах. При фиксированных значениях критериев Re и M получено решение данной задачи в виде полей скоростей и давлений, в частности для перепада давлений между сечениями входного и выходного каналов. С учетом перепада давлений определялось внешнее гидравлическое сопротивление, соответствующее фиксированным значениям Re и M . Анализ полученных результатов показывает, что с ростом амплитуды массовых сил в левом и правом контурах /рис. 1 б/ формируются замкнутые циркуляционные течения, а в зонах спада массовых сил в горизонтальных каналах МДВ-4А - интенсивные вихри.

Установлено, что при обеспечении условия $Re = 7,85 \cdot 10^{-2}$ м реализуется режим течения, при котором расход через левый нижний горизонтальный канал равен нулю /режим "запирания"/.

Полученные зависимости были использованы при отработке рациональных режимов вакуумирования жидкого алюминия в установках непрерывного действия /типа МДВ-4А/.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВАКУУМИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ ВАКУУМНЫХ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Исследование процесса вакуумирования металла в установке МДВ-6А проводилось на сплаве АК7ч. Масса расплава в тигле состав-

ляла 150 ± 10 кг. Определялось влияние на газосодержание сплава остаточного давления в вакуумной камере, температуры и интенсивности движений жидкого металла, характера потока расплава /сплошной или раздробленный на струи в вакуумной камере/.

Оценка содержания водорода в сплаве до и после обработки производилась методом первого пузырька, анализом вакуумных проб, а также с помощью разработанного оригинального способа, основанного на контроле изменения в процессе дегазации тока в индукторе МДВ-6А. Это связано с тем, что при выделении пузырьков водорода в жидком алюминии в каналах установки в процессе вакуумирования металла изменяется сопротивление, что приводит к уменьшению величины тока в индукторе.

Массовая доля оксидов, в частности Al_2O_3 , определялась купрумдихлоридным методом, а массовая доля кислорода нейтроноактивационным анализом. Полученные результаты /рис. 4 а, б, в, г/ показывают, что определяющими параметрами при вакуумной обработке сплава АК7ч являются остаточное давление в вакуумной камере, а также характер и интенсивность перемешивания металла в установке. Рациональные режимы обработки соответствуют температуре металла 720 ± 10 °С, остаточному давлению в вакуумной камере 1,33 кПа, струйной циркуляции металла со скоростью 0,5 м/с. При этом достигаются высокая степень очистки металла от водорода /до $0,05$ см³/100 г/ и оксида алюминия /до 0,018%/.

Это подтверждается и на других группах сплавов. Так пористость сварных швов литых алюминиевых поршней из вакуумированного сплава АК12М2МгН уменьшилась по сравнению с аналогичными серийными изделиями с 5,17 до 0,92%.

На образцах из сплава АК4, 5Kg установлено существенное влияние вакуумирования на стабилизацию механических свойств /среднеквадратичное отклонение величины предела прочности и относительного удлинения для вакуумированного металла уменьшилась в 2 раза/.

Важной особенностью является существенное улучшение структуры сплава АК4, 5Kg, модифицированного комплексным флюсом при соотношении $K_2T_2F_6 : K_2K_2F_6 : KBF_4 = 1:0,8:0,7$ после предварительной вакуумной обработки. В результате этого уменьшается микропористость, измельчаются и глобуляризуются зерна и выделения эвтектики.

Полученные результаты объясняются тем, что под действием электромагнитных сил жидкий алюминий многократно перемешивается

Кинетика удаления водорода и оксидных включений
из алюминиевых сплавов при обработке в вакуумных
магнитодинамических установках.

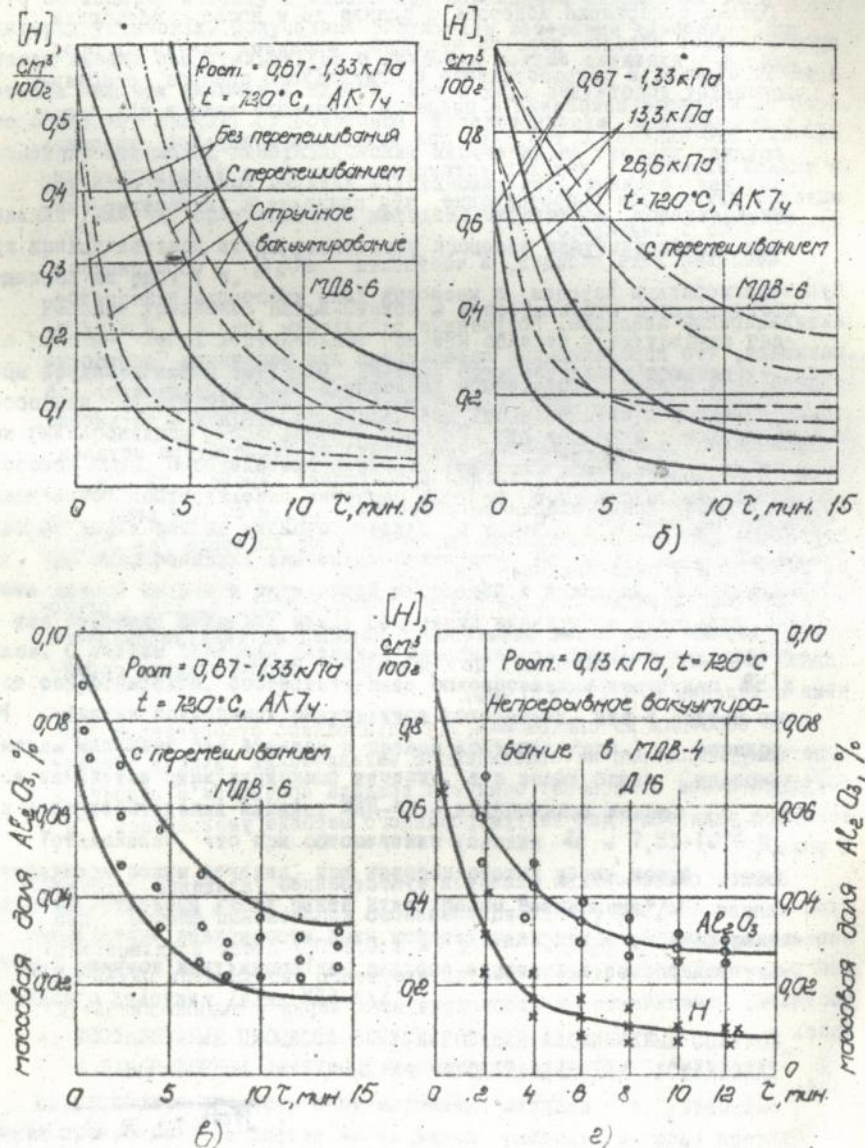


Рис. 4

через границу раздела металл-вакуум, а дробление потока металла на струи существенно увеличивает поверхность вакуумированного сплава. Кроме того, объемные электромагнитные силы в рабочей зоне установки МДВ-6А ориентируют пузырьки выделяющегося водорода в поток, транспортируемый к границе раздела металл-вакуум, при этом одновременно идет флотационное удаление оксидов алюминия.

Исследования процесса непрерывного вакуумирования алюминиевых сплавов производилось на лабораторной установке МДВ-4А с применением тех же методик оценки эффективности обработки металла, что и для МДВ-6А.

Отличительной особенностью полученных результатов является явно выраженная зависимость содержания водорода от интенсивности движения жидкого алюминия через область наложения вакуума и электромагнитных воздействий на расплав /рис. 4 г/. Это объясняется разовым и ограниченным во времени пребыванием металла в зоне обработки.

5. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВАКУУМИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

С учетом проведенных исследований разработаны и внедрены в производство конструкции, футеровочные материалы, системы питания и управления промышленных литейных вакуумных магнитодинамических установок типа МДВ-6А для дискретных литейных процессов с емкостью тигля соответственно 160, 250 и 400 кг жидкого алюминия. С применением этого оборудования и установленных ранее рациональных режимов рафинирования проведена вакуумная обработка сплава АК7ч, из которого различными методами изготовлены отливки для авиационной техники. Результаты механических испытаний вырезанных из них образцов /табл. 1/, свидетельствуют об увеличении по сравнению с серийными изделиями более чем в два раза относительного удлинения δ и в 1,2-1,3 раза предела прочности σ_b .

Разработаны промышленные образцы вакуумных магнитодинамических установок непрерывного действия типа МДВ-4А и проведена их опытно-промышленная проверка на предприятиях Авиационного комплекса при рафинировании деформируемого алюминиевого сплава Д1. Применение рациональных режимов вакуумирования позволило несколько увеличить пластические свойства металла слитков из сплава Д1 при повышенных температурах / 400°C/, в том числе относительного удлинения в 1,2 и относительного сужения в 1,3 раза и что особенно важно обеспечить однородность свойств по сечению слитка.

Отклонение в значениях плотности слитка по данным ультразвукового контроля для различных его зон составило 1,2-1,4% для новой технологии против 3,8-4,0% - для серийной.

Таблица 1

Механические характеристики образцов
из алюминиевых сплавов

Тип образцов	ГОСТ 1583-89		Рафинирование и модифицирование /по зав.техн./		Обработка : МДВ			
					Исходный		После вакуумирования	
	σ_b , МПа	δ , %	σ_b , МПа	δ , %	σ_b , МПа	δ , %	σ_b , МПа	δ , %
Отлитые в кокиль	190	4,0	218	10,4	197	4,6	253	11,8
Отлитые в песчаные формы	180	4,0	189	5,1	177	4,1	197	5,7
Из отливок в кокиль	143	2,0	193	7,8	155	3,9	214	10,0
Из отливок в песчаные формы	135	2,0	190	3,8	173	2,3	202	4,7

Использование в промышленности разработанных технологий и оборудования обеспечивает снижение брака отливок на 20-50%, экономию 40-55 кВтч электроэнергии на тонну литья, уменьшение на 24-35% безразрачных потерь, экономию 8-10% вспомогательных материалов, снижение на 150-190 руб/т литья капитальных затрат / в ценах 1990 г./.

Разработанные технологии и вакуумные МГД-установки прошли успешную опытно-промышленную проверку на ПО "Киевтрактородеталь", Киевском авиационном производственном объединении, Куйбышевском и Ступинском металлургических комбинатах, внедрены на Уфимском моторостроительном производственном объединении /УМПО/ с экономическим эффектом 53 тыс.руб/год /в ценах 1990 г./.. В 1993 году изготовлено и передано в УМПО для промышленной эксплуатации еще четыре установки МДВ-6А.

В рамках Государственной программы "Электротехника Украины" предусмотрен серийный выпуск нового поколения установок МДВ-6А с 1995 г. для удовлетворения потребности предприятий Украины и поставки их на экспорт.

ВЫВОДЫ

1. Предложен новый метод управления процессами теплопереноса при вакуумной обработке алюминиевых сплавов, основанный на комплексном воздействии на расплав электромагнитных полей и вакуума.

2. Разработаны оригинальные технологические схемы вакуумных МДВ-установок магнитодинамического типа, в которых учтена специфика непрерывных МДВ-4А и дискретных МДВ-6А процессов вакуумной обработки алюминиевых сплавов. На их основе созданы макетные и лабораторные образцы экспериментального оборудования, в которых обеспечивается независимое управление температурой нагрева жидкого алюминия, скоростью его движения и степенью разрежения в рабочей камере. Определены их электромагнитные, тепловые и гидравлические характеристики.

3. Выполнен теоретический анализ движения пузырьков водорода в жидком металле при вакуумной обработке алюминиевых сплавов в магнитодинамических установках. Определено, что интенсивность всплывания пузырьков водорода в жидком металле в условиях наложения на расплав вакуума и электромагнитных объемных сил /ЭМОС/ зависит от скорости движения металла, величины и градиента плотности ЭМОС. При этом в поле ЭМОС процесс всплывания пузырьков существенно ускоряется. Определены критические значения размера пузырьков /более 1 мм/, для которых наблюдается необратимый процесс их роста и удаления из расплава в вакууме. Показано, что при мощности установок МДВ до 40 кВт обеспечивается управление температурой жидкого металла в пределах 680-900°C, напором до 0,3 МПа, расходом от 0,1 кг/с до 3,0 кг/с.

4. Создана оригинальная методика определения напорных характеристик в каналах магнитодинамических установок МДВ-6А, основанная на принципе уравнивания электромагнитного давления пневматическим и определении момента компенсации по началу изменения величины электрического тока в канале. С ее помощью исследовано течение металла в каналах установки МДВ-6А, которое представляет собой непрерывную цепь замкнутых вихрей, что дополнительно подтверждено характером зарастания стенок канала оксидными включениями.

5. Разработана оригинальная методика измерения напора в установках МДВ-4А с непрерывным процессом вакуумирования алюминиевых сплавов, основанная на принципе уравнивания электромагнитного давления силами разрежения.

6. Изучено с применением численных методов течение металла в каналах и вакуумной камере установки МДВ-4А в режиме непрерывного вакуумирования в диапазоне изменения чисел массовой силы M от 0 до 425. Разработана математическая модель и расчетом показано, что с ростом амплитуд массовых сил в каналах установки формируются циркуляционные течения, а в зонах спада массовых сил в горизонтальных каналах МДВ - интенсивные вихри. Впервые обнаружен режим течения металла, характеризующийся критерием Рейнольдса Re , при котором расход металла через канал установки МДВ-4А равен нулю /режим заклинивания/ и установлена описывающая этот режим зависимость $Re = 7,65 \cdot 10^{-2} M$.

7. Впервые создан оригинальный метод и прибор для контроля кинетики дегазации алюминиевых сплавов, основанные на эффекте изменений электрического тока в каналах магнитодинамических установок при пузырьковом выделении водорода в процессе вакуумирования.

8. Изучено влияние режимов вакуумирования алюминиевых сплавов АК7С, АК12М2Мен, АМ4,5Кг в магнитодинамических установках МДВ-6А и Д1 - в МДВ-4А. Установлено, что для дискретных литейных процессов максимальная полнота очистки алюминиевых сплавов от водорода до $0,05 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ и оксида алюминия до 30-40% достигается в течение 10-15 мин обработки при температуре металла в пределах 680-740°C, комплексом воздействий на расплав в рабочей зоне МДВ-6А переменного электрического тока порядка $10^4 - 10^6 \text{ А}$, переменного магнитного поля до 0,3 Тл, электромагнитных объемных сил $f_{эм}$ до 3-5 Н/м^3 , вихревых структур в зоне спада магнитного поля, а также струйного прохождения расплава через зону наложения вакуума $1,33 \text{ кПа/с}$ кратностью 2-3.

Определено, что рациональные режимы дегазации алюминиевых сплавов в вакуумных МД-установках МДВ-4А непрерывного действия /температура 680-700°C, расход металла через вакуумную камеру 1,0-1,2 кг/с, рабочий вакуум 2,66 кПа/ обеспечивают снижение содержания водорода от 0,08 до 0,10 $\text{см}^3/100 \text{ г}$ и уменьшение массовой доли оксидных включений на 60%.

9. Показано, что предварительное вакуумирование алюминиевых сплавов повышает эффективность последующего микролегирования сплавов АМ4,5Кг цирконием и титаном.

10. Изучено влияние состава волокнистого футеровочного материала на основе каолинового волокна и огнеупорного цемента - волокна на его свойства. Установлена зависимость прочностных и эксплуатационных характеристик от соотношения входящих в его состав

компонентов. Разработана технология изготовления из этого материала футеровки.

11. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны опытно-промышленные вакуумные МГД-установки для дискретных литейных процессов типа МДВ-6А и непрерывных металлургических - МДВ-4А, обеспечивающие дегазацию и последующую электромагнитную заливку металла в литейные формы и кристаллизатор. Технические характеристики таких установок дают возможность их использования в комплексе со всем существующим промышленным литейным и металлургическим оборудованием для производства и разлива алюминиевых сплавов.

12. Разработаны промышленные технологии вакуумной обработки алюминиевых сплавов в установках МДВ-6А и МДВ-4А. Применение таких технологий и оборудования /МДВ-6А/ в литейных технологиях авиационной промышленности и машиностроения позволило на сплавах АК7С и АК12М2МгН снизить пористость отливок на 2-3 балла по шкале ВИАМ, увеличить пластические характеристики δ , σ_s в 2-2,5 раза и прочностные σ_b на 10-15% обеспечить стабильность свойств во всех сечениях, уменьшить брак литья на 25-30%, осуществить свариваемость поршей из сплава АК12М2МгН электронным лучом, что не достигается при использовании других методов обработки металла.

Использование таких технологий при получении слитков для авиационной техники обеспечило увеличение прочностных характеристик сплава Д1 на 13-15%, а пластических - на 25-30%, стабилизацию свойств и исключение дефектов по сечению слитков, повышение выхода годного на 1,5-2,0%.

13. Разработанные технологии и вакуумные МГД-установки прошли успешную опытно-промышленную проверку на ПО "Киевтрактородеталь", КИАПО, Куйбышевском и Ступинском металлургических заводах, внедрены на Уфимском моторостроительном производственном объединении /УМПО/ с экономическим эффектом 53 тыс.руб/год /в ценах 1990 г./ . В 1993 г. изготовлено и передано УМПО еще четыре установки МДВ-6А.

В рамках Государственной программы "Электротехника Украины" предусмотрен серийный выпуск нового поколения установок МДВ-6А с 1995 г. для удовлетворения потребности предприятий Украины и поставки их на экспорт.

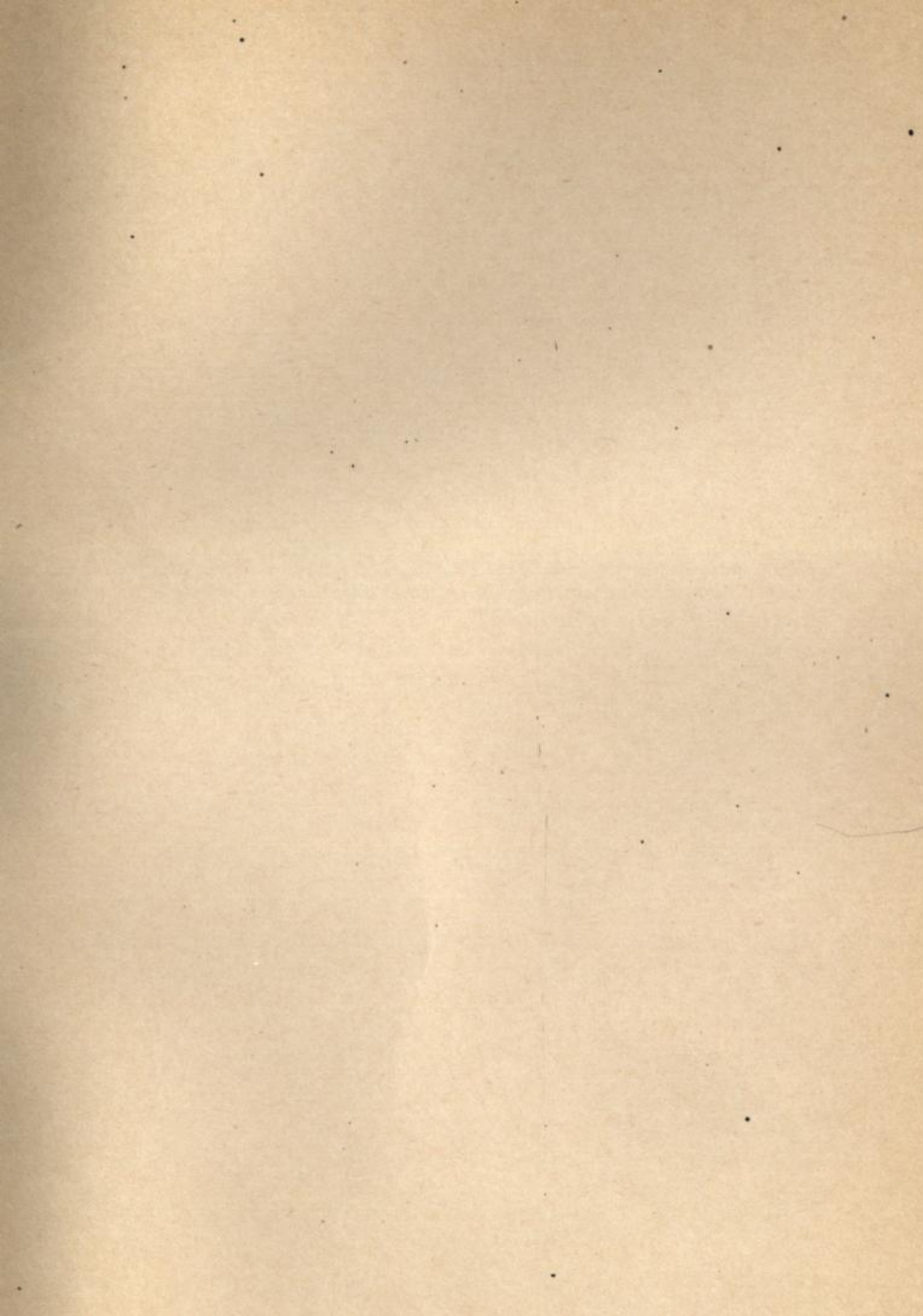
ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО
В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Пужайло Л.П., Полищук В.П. Магнитодинамическая установка для циркуляционного вакуумирования // Литейное производство. - 1972. - № 4. - С.15.
2. Полищук В.П., Пужайло Л.П. Конструктивные особенности магнитодинамической установки для циркуляционного вакуумирования алюминиевых сплавов // Сб. трудов УП Рижского совещания по магнитной гидродинамике. - Рига: Зинатне, - 1972, - ч.Ш, - С.87-88.
3. Пужайло Л.П., Левада Г.А. Экспресс-анализ газов в алюминиевых сплавах при обработке их в магнитодинамических установках // МГД в металлургии и литейном производстве. - Киев: ИДЛ АН УССР. - 1972, - С. 55-57.
4. Пужайло Л.П., Полищук В.П., Борисов Б.П. Методика измерения напора электромагнитных насосов // Магнитная гидродинамика. - 1973. - № 1. - С.154.
5. Пужайло Л.П., Полищук В.П., Варнаровский И.Н. и др. Дегазация сплава АЛ9 с помощью магнитодинамической установки для циркуляционного вакуумирования. // Технология и организация производства. - 1973. - № 8. - С.47-48.
6. Пужайло Л.П., Полищук В.П. Вакуумирование и непрерывная разливка алюминиевых сплавов магнитодинамической установкой МДВ-4А-02 // Технология легких сплавов. - 1974. - №2. - С.90-92.
7. Полищук В.П., Пужайло Л.П., Макаров Г.С. и др. Исследование магнитодинамической установки для вакуумирования и непрерывной разливки алюминиевых деформируемых сплавов в промышленных установках. Материалы IX Рижского совещания по магнитной гидродинамике. ч.Ш. - Саласпилс: "Зинатне". - 1978. - С.128.
8. Пужайло Л.П., Блохина С.В., Прохоренко Л.Н. Исследование теплофизических и эксплуатационных свойств вологран - нового материала для футеровки МДН // Применение магнитодинамических установок в литейном производстве. - Уфа. - 1980. - С.105-107.
9. Полищук В.П., Пужайло Л.П., Ермачков О.А. и др. Футеровка для каналов магнитодинамической установки МДН-6 // Литейное производство. - 1981. - № 4. - С.34.
10. Гельфгат В.М., Соркин М.З., Полищук В.П., Пужайло Л.П. О движении газовых пузырьков при вакуумировании жидкого алюминия в установках типа МДВ // Магнитная гидродинамика. - 1982, № 4. - С.105-109.

11. Ju. M. Bel'gat, V.P. Polischuk, L. P. Puzhaylo, M. X. Sorokin
Kinetic Characteristics of Gas Bubble Motion in Liquid
Metal under vacuum proceedings in the MHD Sols-
Abstracts of XI Symposium on Liquid Metal
Magnetohydrodynamics, Riga, 1988. p.22.
12. Gas bubbles motion during vacuum treatment of
liquid aluminium in MHD-type devices / Ju. Bel'gat,
V. Polischuk, L. Puzhaylo and M. Sorokin / Liquid Metal
Magnetohydrodynamics edited by G. Lidopoulos and
A. Morari, Kluwer Academic Publishers, vol 10, 1989, p.145-153.
13. Пужайло Л.П., Прохоренко Л.Н., Ермачков О.А. О "заарастании" ка-
налов индукционных каналных печей и магнитодинамических уста-
новок // Сб. научных трудов АН УССР. Институт проблем литья.-
Киев, 1989. - С.70-78.
14. J. P. Puzhailo Study: of the Aluminium Alloys
Refining in vacuum Magnetodynamic Units //
MHD proceed to protection of environment - Ukraine, 1992,
p.71.
15. Дубоделов В.И., Цин М.А., Пужайло Л.П. и др. Применение магни-
тодинамических установок в новых литейных технологиях. // Ли-
тейное производство. - 1992. - № 9. - С.29-31.
- 16-55. Изобретения по теме диссертации:
№№ 254543, 274805, 277311, 281508, 286780, 287059, 2870501,
287744, 301220, 304302, 350836, 359493, 373309, 417491,
423999, 431230, 431242, 431961, 434105, 435286, 438498,
440074, 442127, 452608, 502959, 538032, 539962, 638097,
669710, 860752, 934182, 944779, 1042415, 1132238, 1164541,
1376695, 1393953, 1416024, 1424958, 1528064.
- 56-63. Патенты:
Канада № 1050757, США № 4014529, Франция № 2302345,
ФРГ № 2501603, Чехословакия № 192906, Швеция № 293127,
Швейцария № 606452, Япония № 1031554.

Подписано к печати 12.XI.93. Формат 60x84/16
Бумага офсетная Усл.-печ.лист.1,0. Уч.-изд.лист 1,0.
Тираж 100. Заказ 141 Бесплатно

Типография НПО "Камет"
252062, Киев-62, проспект Победы, 65



AB 28.583