

На правах рукописи

ДЕНИСОВ Максим Сергеевич

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЗАГОТОВОК
ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

Специальность: **05.13.06** – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Брянск 2019

Диссертационная работа выполнена на кафедре автоматизация технологических процессов ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Научный
руководитель **Коростелев Владимир Фёдорович,**
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ

Официальные
оппоненты: **Затонский Андрей Владимирович,**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский
политехнический университет», Березниковский филиал
зав. кафедрой автоматизации технологических процессов

Капитанов Алексей Вячеславович,
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
зав. кафедрой автоматизированных систем обработки ин-
формации и управления

Ведущая
организация ФГАОУ ВО «Белгородский государственный
национальный исследовательский университет»

Защита диссертации состоится 31 октября 2019 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 999.112.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук», Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет» по адресу: Россия, 241035, г. Брянск, ул. Харьковская, д. 10-Б, учебный корпус № 4, ауд. Б101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» и на сайте:
<https://www.tu-bryansk.ru/mainpage/dissertatsii/denisov-maksim-sergeevich>

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

В. А. Хандожко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящий момент процессы кристаллизации высокопрочных алюминиевых сплавов представляют собой сложный, до настоящего времени недостаточно изученный процесс, в котором формируются свойства металлопродукции ответственного назначения. Этот процесс включает тепло-массообмен, фазовые превращения, химические реакции, выделение растворенных газов и неметаллических соединений. Кроме того, в процессе кристаллизации возникают дефекты ликвации, рыхлота, пористость, газовые и усадочные раковины, отрицательное влияние которых, на такие свойства как твердость, пластичность и упругость устраняют в прокатном и кузнечно-штамповочном производствах.

Изучение научно-технических материалов показывает, что существующие автоматизированные системы управления технологическими процессами литья недостаточно эффективны. Подобные системы управления неспособны в режиме реального времени измерять, контролировать и корректировать такие технологические параметры процесса, влияющие на формирование свойств конечной продукции как, время и характер распределения температуры в технологической оснастке и отливке, скорость наложения давления на кристаллизующийся металл, величина накладываемого давления.

Из открытых источников видно, что возможность обработки давлением металла до начала кристаллизации остается не достаточно изученной.

До конца не ясно, как в отливке добиться такого же равномерного распределения компонентов, газовых и неметаллических включений, как в перегретом жидком металле, так как при температурах, близких к солидусу могут активно развиваться процессы диффузии, нарушающее то распределение, которое было при наложении давления. Сложным и не управляемым остается процесс сжатия кристаллической решетки до таких пределов, при которых можно было бы исключить диффузию компонентов по дефектам структуры. В свою очередь, добиться более равномерного распределения интерметаллидов, неметаллических и газовых включений за счет сжатия жидкого металла при температуре, которая, например, на 30...50 К превышает равновесный ликвидус, задача вполне конкретная и технологически выполнимая. И если речь идет о приближении структуры и свойств заготовок поршней ДВС из высокопрочных алюминиевых сплавов к лучшим показателям пластически деформированных заготовок, то актуальность нового процесса распространяется и на массовые изделия из других сплавов.

В этой связи можно утверждать, что автоматизация процесса производства заготовок из высокопрочных алюминиевых сплавов с повышенными, стабильно-прогнозируемыми показателями качества на основе тех-

нологии литья с кристаллизацией под высоким давлением за счет применения программируемого наложения давления на жидкий и кристаллизующийся металл является **актуальной научно-технической задачей**.

Степень разработанности проблемы. На сегодняшний день в работах Абрамова И.В., Аверченкова В.И., Бесекерского В.А., Брюханова В.Н., Митрофанова В.Г., Протопопова С.П., Соломенцева Ю.М., Схиртладзе А.Г. и др. заложены теоретические основы управления технологическими процессами и производствами. Разработаны подходы и имеется определенный опыт решения задач автоматизации управления. Разработаны модели и алгоритмы, позволяющие прогнозировать отдельные свойства металлопродукции на выходе (Селиванов А.А., Прудников А.Н., Афанасьев В.К., Бланк В.Д., Калинин Б.А.). Определены особенности управления в пространстве переменных состояний (Ang K.H., Ziegler J.G., Кондрашин А.В., Красовский А. А., Мирошник И. В., Паршева Е. А., Терехов В. А., Галяев Е. Р.). Предпринимались попытки интеграции сложных производственных процессов в единое информационное пространство предприятия (Петров И. В., Ключев А.С., Чичилин А. А., Штейнберг Ш. Е., Astrom K.J., Васильев В.И.).

Достижения ученых в данной работе используются при разработке системы управления наложением давления на кристаллизующийся металл.

Предлагаемый процесс сравнивается с процессом жидкой штамповки. Автоматизацией данного процесса занимались ученые: Тимофеев Г.И., Марков В.В., Гейко И.В., Килин В.М., Быков П.А. и др. Однако названные авторы не решили комплексно и во взаимосвязи проблемы автоматизированного управления и прогнозирования свойств конечной металлопродукции, интеграции производственных процессов предприятия с единым пользовательским интерфейсом, что приводит к снижению эффективности производства, необоснованным трудовым и финансовым затратам.

Объектом исследования является АСУ ТП производства заготовок из высокопрочных алюминиевых сплавов, а **объектом управления** – процесс формирования структуры и свойств металла.

Предметом исследования является процесс программно-корректируемого наложения давления на кристаллизующийся металл.

Целью исследования является улучшение физико-механических свойств заготовок из высокопрочных алюминиевых сплавов и снижение затрат на производство продукции на основе автоматизации управления наложением давления на жидкий и кристаллизующийся металл.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

- 1.Выполнен анализ свойств объекта управления.
- 2.Выбраны технические средства автоматизации и разработано технологическое обеспечение для проведения исследований.

3. Разработана математическая модель функционирования автоматизированной системы управления, реализующая программируемое наложение давления на кристаллизующийся металл.

4. Разработана структура автоматизированной системы управления.

5. Разработан алгоритм и соответствующее программное обеспечение для автоматизированной системы управления, реализующий управление наложением давления на кристаллизующийся металл.

6. Исследована работа автоматизированной системы, обеспечивающей управление наложением давления на кристаллизующийся металл.

Методика исследования

Все исследования проводились на основе принципов системного подхода, включающего теоретический анализ и экспериментальные исследования, сравнительный анализ результатов в лабораторных и производственных условиях.

При решении поставленных задач использовались методы теории автоматического управления, структурного анализа и моделирования, а также металлофизические методы исследования.

Достоверность полученных результатов обуславливается корректной постановкой задач. Принятые допущения и используемые теоретические зависимости обоснованы; в работе использовались математические методы и методы системного анализа, полученные результаты подтверждаются соответствием теоретических и экспериментальных исследований процессов управления.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в том, что получены новые научные результаты:

1. Разработан принцип программно-корректируемого управления наложением давления путем изменения начального давления в гидросистеме, на основе которого осуществляется автоматизация производства заготовок из высокопрочных алюминиевых сплавов (п. 1).

2. Разработана математическая модель гидравлического привода, учитывающая значения возмущающих воздействий, действующих в процессе обработки металла в режиме реального времени, позволяющая осуществить алгоритмизацию управления и обеспечить поддержку на заданном уровне параметров, осуществляющих управление процессом по заранее заданному закону управления, согласованному с сжимаемостью металла. (п. 4).

3. Установлены закономерности изменения свойств от степени сжимаемости расплава, зависящей от температуры, величины давления и скорости его наложения, составляющая научную основу построения АСУ ТП производства заготовок из высокопрочных алюминиевых сплавов (п.3).

Практическая значимость работы состоит в том, что:

- разработан и реализован алгоритм автоматизированного управления,

обеспечивающий формирование заданных структуры и свойств получаемых заготовок из высокопрочных алюминиевых сплавов;

- на основе результатов выполненных исследований и разработок сформирована база данных для обоснования режимов автоматизированного управления;

- разработана автоматизированная система управления, позволяющая поддерживать заданный закон наложения давления на кристаллизующийся металл.

Применение предложенной методики построения системы управления процессом наложения давления на кристаллизующийся металл позволяет повысить качество проектирования, эффективность расчетов и моделирования технологических процессов наложения давления на кристаллизующийся металл на 15%. Сократить затраты на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в 1,5 раза, а также стендовых и натурных испытаний в 2 раза; получить экономию материалов и ресурсов на 20% с повышением физико-механических и эксплуатационных свойств выпускаемых деталей и изделий на 30%, что подтверждается Актом внедрения результатов диссертационной работы.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Принцип программно-корректируемого управления наложением давления путем изменения начального давления в гидросистеме, на основе которого осуществляется автоматизация производства заготовок из высокопрочных алюминиевых сплавов.

2. Математическая модель гидравлического привода, учитывающая значения возмущающих воздействий, действующих в процессе обработки металла в режиме реального времени, позволяющая осуществить алгоритмизацию управления и обеспечить поддержку на заданном уровне параметров, осуществляющих управление процессом по заранее заданному закону управления, согласованному с сжимаемостью металла.

3. Закономерности изменения свойств от степени сжимаемости расплава, зависящей от температуры, величины давления и скорости его наложения, составляющая научную основу построения АСУ ТП производства заготовок из высокопрочных алюминиевых сплавов.

Апробация работы

В ходе выполнения диссертационной работы были получены результаты, которые докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Автоматизация технологических процессов» Владимирского государственного университета, а также на региональных, всероссийских и международных научных конференциях: 11-ый международный конгресс «Машины, технологии, Материалы» (Варна, Болгария 2014); 6-я Всероссийская конференция по наноматериалам с элементами научной школы для молодежи «НАНО-2016» (Москва 2016); 9-я Международная

конференция ФППК-2016, посвященная памяти академика Г.В. Курдюмова, и вторая Всероссийская молодежная школа «Структура и свойства перспективных материалов» (г. Черноголовка 2016); 3-й междисциплинарный молодежный научный форум с молодежным участием «Новые Материалы-2017» (Москва 2017); 17th International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nano-Design, Technology, Computer Simulations Minsk, Republic of Belarus, 2017; Всероссийская молодежная интернет-конференция «Актуальные проблемы автоматизации технологических процессов» (Владимир 2013, 2014, 2015, 2016), Far East Con – Международная мультидисциплинарная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям (г. Владивосток, 2018-2019 гг.), международный семинар «Передовые технологии в аэрокосмической отрасли, машиностроении и автоматизации» (г. Красноярск, 2018-2019 гг.).

Результаты работы использовались при реализации НИР: «Разработка новых методов изостатической опрессовки расплавов при варьируемых температурно-временных режимах наложения давления для создания сплавов с особыми физико-механическими свойствами» (х/д, ООО НПЦ ИНОР).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 36 печатных работ в виде научных статей и тезисов докладов, в числе которых 6 включены в международную базу Web of Science и Scopus, 14 в рецензируемых печатных изданиях, утвержденных ВАК России, 11 в рецензируемых печатных изданиях РИНЦ, получено 2 патента на изобретение, 2 патента на полезную модель и 1 свидетельство на государственную регистрацию программы для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации изложен на 161 странице, в том числе: 123 страницы основного текста, включающего 64 рисунка, 17 таблиц, списка литературы из 125 наименований и 4 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражены: анализ состояния и актуальность темы диссертационной работы, степень ее разработанности, объект и предмет исследования, цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, апробация результатов.

В первой главе «Оценка состояния автоматизации производства заготовок из высокопрочных алюминиевых сплавов» проанализированы особенности обработки жидкого и кристаллизующегося металла давлением. Проведен анализ методов управления сложными производственными про-

цессами. На основе анализа выявлена целесообразность разработки автоматизированной системы управления процессом наложения давления на кристаллизующийся металл. Проведен обзор современных систем управления.

Показано, что высокое качество готовой продукции при минимальных материальных и энергетических затратах возможно обеспечить за счет автоматизации управления основными параметрами технологического процесса с использованием современных контрольно-измерительных систем и средств автоматизации интегрированных в АСУ.

Проанализированы литературные источники, в которых вопросы программного управления сложными технологическими процессами поднимали С.С. Одинг, И.А. Кретов. Общий анализ систем с программным управлением технологическими процессами литья проводили Н.В. Антонов, В.А. Терехов, И.Ю. Тюкин. Такие ученые, как Егоров С.В., Кузин Р.Е, Александровский Н.М., в своих работах отмечают актуальность систем с программным управлением и отмечают, что подобные системы управления применяются для управления различными технологическими процессами.

Обзора научной литературы помог сформулировать цель и поставить задачи исследований.

Установлено, что входными параметрами процесса литья заготовок из высокопрочных алюминиевых сплавов являются температура металла, температура формы, химический состав обрабатываемого металла или сплава.

Показано, что выходными параметрами процесса являются производительность, отсутствие дефектов, повторяемость и прогнозируемость физико-механических свойств заготовок.

Доказано, что управляющими воздействиями для процесса являются температура формы и температура заливаемого металла, величина накладываемого давления, скорость наложения давления, время выдержки под давлением.

Утверждается, что за счет контролируемого наложения давления на кристаллизующийся металл становится возможным управлять процессом формирования физико-механических свойств металлопродукции.

Вторая глава *«Разработка технологического оборудования с возможностью научных исследований»* посвящена проектированию и созданию оборудования, технологической оснастки, методики исследования, средств измерения и контроля.

Обработка кристаллизующегося металла давлением и возможность реализации идеи управления процессом формирования свойств литых заготовок осуществляется на специальном исследовательском технологическом комплексе, в составе которого используется гидравлический пресс с усилием запираания пресс-формы 300 тс (рис. 1).



Рисунок 1. Общий вид гидравлического пресса

Управление работой гидравлического пресса осуществляется в автоматизированном режиме от ЭВМ.

Спроектирована и изготовлена технологическая оснастка (рис. 2).

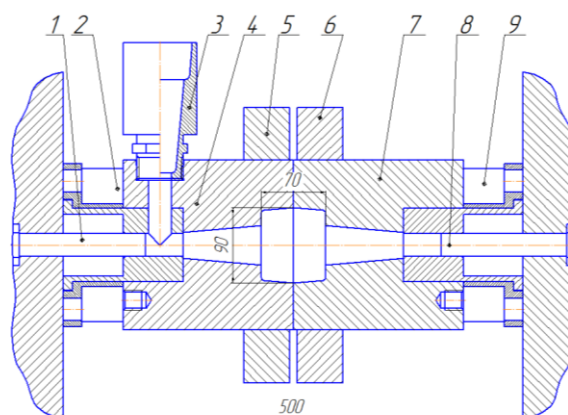


Рисунок 2. Чертеж технологической оснастки для производства заготовок поршей ДВС

Разработана контрольно-измерительная система (КИС), позволяющая осуществлять запись основных параметров технологического процесса. Результаты измерений, в графическом виде отражают, изменение температуры металла и формы, движение плунжеров, а также изменение давления в гидроцилиндрах пресса.

Используемое программное обеспечения для фиксации основных параметров процесса представлено на рис. 3.

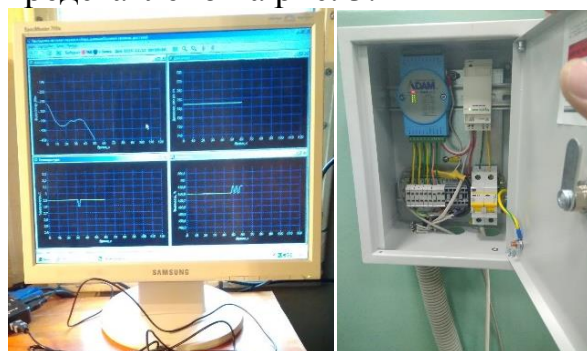


Рисунок 3. Внешний вид программного обеспечения ASAD 2.0

Информация с датчиков записывается в виде графиков. Записываемые графики характеризует поведение системы во время процесса наложения давления на кристаллизующийся металл.

Обработка графиков позволяет представить развитие процесса во времени с учетом фактического перемещения прессующих плунжеров в мм.

Суммарное перемещение прессующих плунжеров дает возможность рассчитать объем запрессованного металла внутрь отливки. Располагая такой информацией можно определить относительную сжимаемость, которая будет равна:

$$\varepsilon = \frac{V_{кр}}{V_0} * 100\%, \quad (1)$$

где V_0 – общий объем металла, залитого в форму, $V_{кр}$ – объем металла, запрессованного в отливку.

В третьей главе «Математическое обеспечение автоматизированной системы управления», приведены результаты математического моделирования.

Процесс обработки кристаллизующегося металла описывается системами дифференциальных уравнений первого порядка, включающих уравнения перемещения прессующих плунжеров, уравнение изменения давления жидкости в гидросистеме, а также уравнение изменения расхода рабочей жидкости в гидросистеме пресса.

В общем виде давление зависит от совокупности факторов и представлено уравнением следующего вида (2):

$$p(t) = f(\gamma, \omega, \alpha_0, \beta, E, W_0), \quad (2)$$

где γ – угол наклона заслонки;

ω – угловая скорость вала;

α_0 – угол разворота распределителя;

β – угол в плоскости (дополнительный);

E – модуль упругости жидкости;

W_0 – объем поршневой камеры;

p – давление рабочей жидкости.

В основе разработанной математической модели гидравлического насоса заложена модель процесса в поршневой камере. При этом результатом моделирования является давление, создаваемое поршневой камерой.

Моделирование гидронасоса позволяет исследовать режимные параметры давления в поршневой камере при заданных режимах работы насосного агрегата, а также позволяет оценить необходимые нагрузки на органе регулирования, провести оптимизацию конструкции насоса и механизмов управления.

Построены графики, характеризующие относительное изменение объема жидкого металла и давления в зависимости от времени (рис. 4,5)

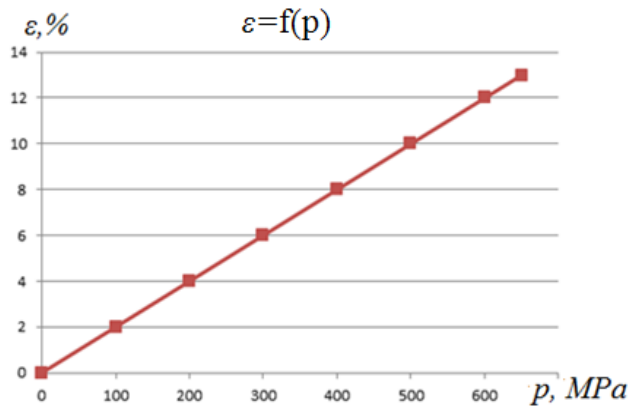


Рисунок 4. Зависимость сжимаемости сплава от величины накладываемого давления

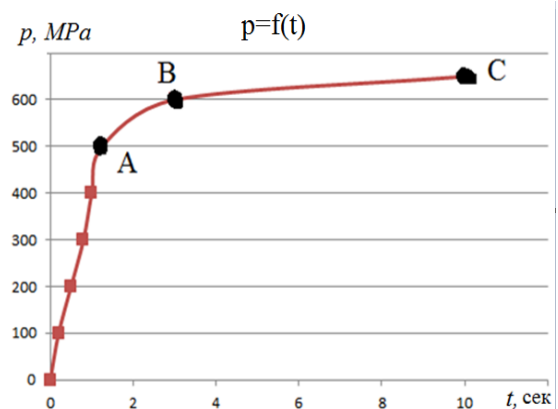


Рисунок 5. Зависимость давления во времени

Обозначения: Обозначения: ε – сжатие металла в %, p – давление в гидросистеме в МПа.

Задача управления наложением давления требует построения формализованной модели, которая устанавливает зависимость сжимаемости кристаллизующегося металла от величины накладываемого давления и скорости его наложения.

Таким образом, кривую $\varepsilon(t)$ можно представить тремя уравнениями следующего вида (3), где выходом системы является сжимаемость, а на входе давление.

$$\varepsilon = k_1 * p(t) \quad (3)$$

$$\begin{cases} p(t) = k_2 * t, & 0 < t < t_1 \\ p(t) = k_3 * t + b, & t_1 < t < t_2 \\ p(t) = k_4 * t, & t_3 < t < t_4 \end{cases}$$

Обозначения: k, k_1, k_2 – коэффициенты модели, $p(t)$ – давление на участках OA, AB, BC; t – текущее время; $0 - t_1, t_1 - t_2, t_2 - t_3$ – интервалы времени, характеризующие участки OA, AB, BC.

Этапы формирования кристаллизующегося металла определяет положение точек ABC на кривой сжимаемости, а в зависимости от давления и степени опрессовки, формируется структура конечной продукции.

Так, динамика привода, гидрокинематическая схема которого приведена на рис. 6, может быть представлена следующей системой уравнений гидропривода:

$$\begin{aligned} M\Delta\ddot{x} &= S\Delta p - \lambda\Delta\dot{x} - \Delta R, \\ \Delta\dot{p} &= \frac{E}{V}(2K_y\Delta y - K_p\Delta p - 2S\Delta\dot{x}), \\ \Delta y &= K_\phi\Delta\varphi, \\ \Delta\varphi &= K_9(\Delta x_3 - K_{o.c1}\Delta x), \\ \Delta\varphi &= K_9(\Delta F_3 - K_{o.c2}\Delta F), \end{aligned} \quad (4)$$

где M – масса подвижных частей, кг; $\ddot{x}$ – ускорение м/с²; $\dot{x}$ – скорость, м/с; x – перемещение поршня, м; S – площадь поршня, м²; p – давление в гидросистеме, Па; $\lambda = \partial \sum T / \partial \dot{x}$ – коэффициент вязкого трения в направляющих и уплотнениях штока, кг/с; T – сила трения, Н; R – полезная нагрузка, Н; E – модуль упругости рабочей жидкости, Па; $V = SL/2$ – объем полости гидроцилиндра, м³; L – длина хода, м; y – смещение активного элемента РД, м; K_y – коэффициент усиления активного элемента РД, характеризующий возрастание расхода при увеличении рабочей щели; K_p – коэффициент податливости активного элемента РД, характеризующий уменьшение расхода при возрастании перепада давления в полостях гидроцилиндра; φ – угол поворота ШД, рад; K_ϕ – коэффициент усиления ШД; K_ω – передаточные отношения цепей ЭВМ; K_{oc1} – передаточные отношения цепей управления перемещением поршня; K_{oc2} – передаточные отношения цепей управления по силе.

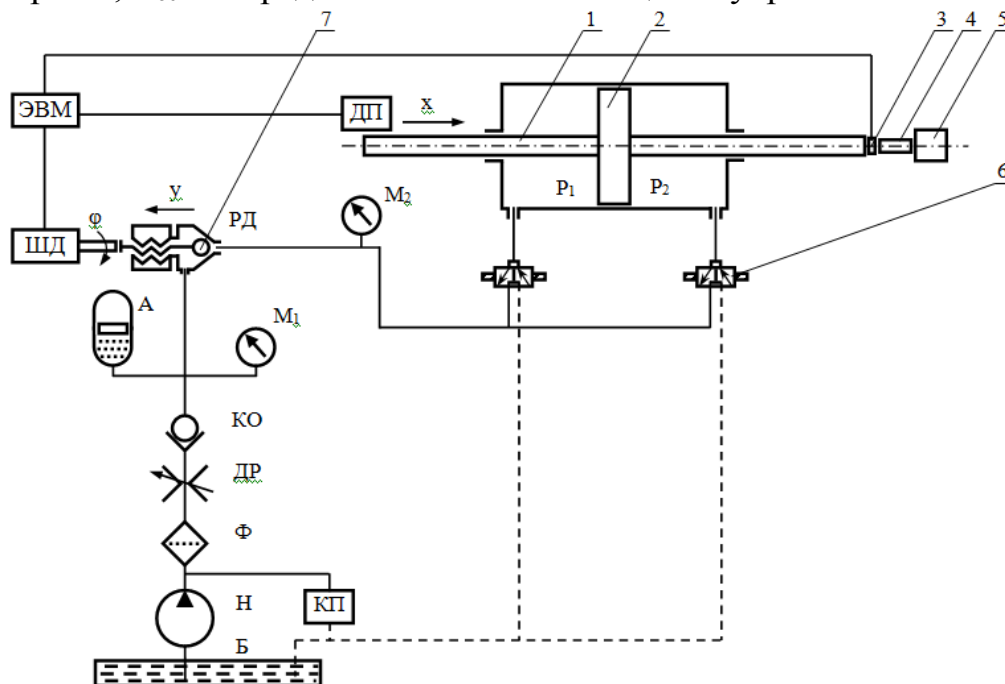


Рисунок 6. Гидрокинематическая схема привода

1 – шток; 2 – поршень; 3 – динамометр; 4 – плунжер; 5 – технологический объект; 6 – гидрораспределитель; 7 – активный элемент регулятора давления РД; ДП – датчик перемещения; М – манометр; А – аккумулятор; КО – клапан обратный; ДР – дроссель; Ф – фильтр; Н – насос; Б – бак; КП – клапан перепускной.

Из формулы (4) видно, что как прямая, так и обратная задача динамики может быть решена, если известен закон движения или сила, действующая в данном случае на поршень.

Схема позволяет наглядно показать взаимосвязь элементов гидропривода с помощью структурной схемы (рис. 7).

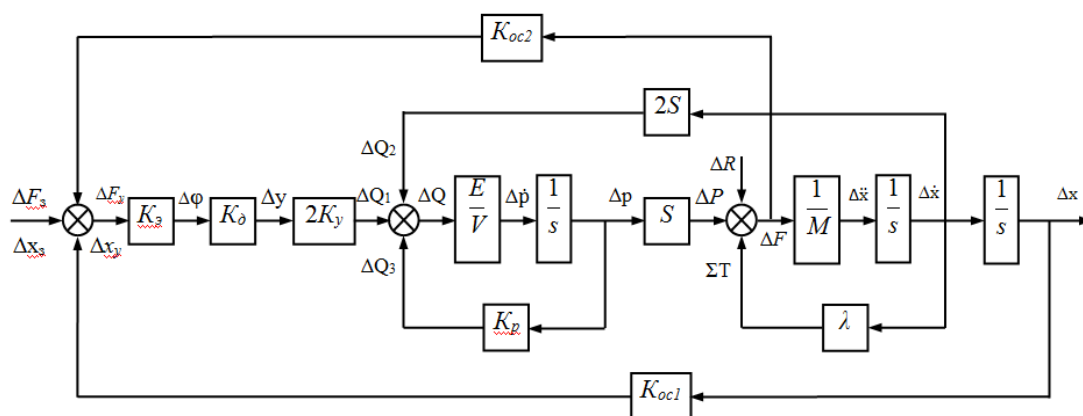


Рисунок 7. Структурная схема гидропривода

Установлено, что разработанная модель позволяет изучить влияние параметров системы управления прессом на динамические процессы при наложении давления на кристаллизующийся металл.

Четвертая глава «Разработка автоматизированной системы программного наложения давления на жидкий и кристаллизующийся металл» посвящена проектированию системы управления и разработки алгоритмов управления.

В соответствии с требованиями, разработана общая структура системы управления (рис. 8).

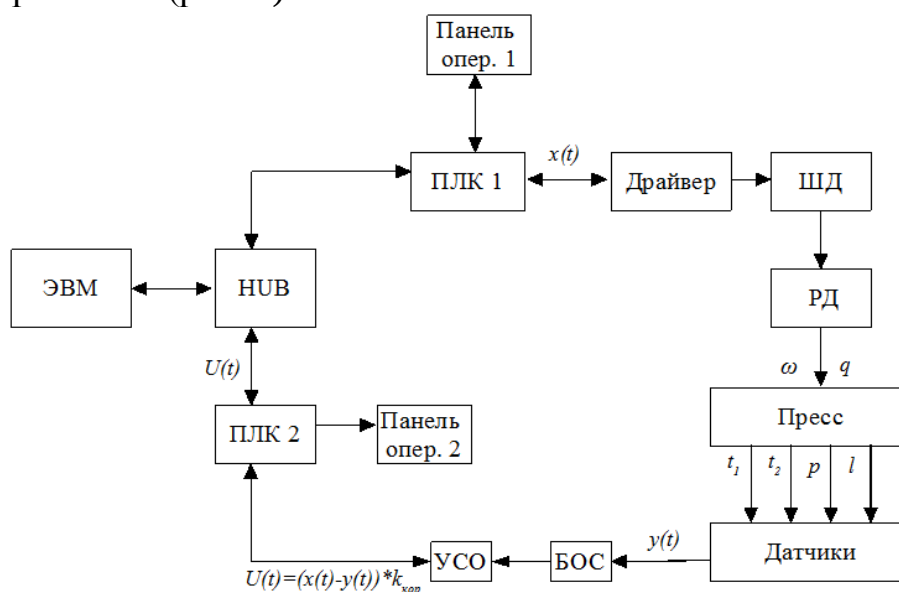


Рисунок 8. Общая структура системы управления

Во время работы пресса в автоматизированном режиме ПЛК1 определяет начальные значения $x(t)=p_0(t), x_0(t), v_0(t)$, тем самым задает частоту вращения двигателя гидронасоса ω и расход рабочей жидкости, проходящей через дроссельную заслонку q . Контрольно-измерительные приборы, установленные на прессе, передают измеряемые параметры на блок регулирования, который, их сравнивает с заданными значениями и при необходимости

вычисляет корректирующий коэффициент $k_{кор}$. При этом используется следующий закон управления: если $|p_{эксн}| < 0,2 * |p_{мат}|$, то $k_{кор} = p_{эксн} * k_1$; где $k_1 < k_{эксн}$. ПЛК2 генерирует управляющий сигнал $U(t)$ и транслирует его на ЭВМ, после чего обработанный сигнал поступает на ПЛК1.

Новизна системы управления заключается в общем принципе управления по отклонению, когда система управления описывается передаточной функцией разомкнутой системы и уравнением замыкания:

$x(t) = g(t) - y(t)Woc(p)$, а алгоритм работы системы управления стремится свести ошибку $x(t)$ к нулю.

Достоинством такого подхода является наличие блока обратной связи (БОС), что способствует уменьшению ошибки независимо от внешних возмущений.

Переходя к первообразным функциям, задачу управления, связанную с достижением максимального уплотнения кристаллизующегося металла, можно представить в следующем виде:

$$\varepsilon = f(p, \tau) \rightarrow \max.$$

С учетом вышесказанного разработан алгоритм автоматизированного управления процессом (рис. 9).

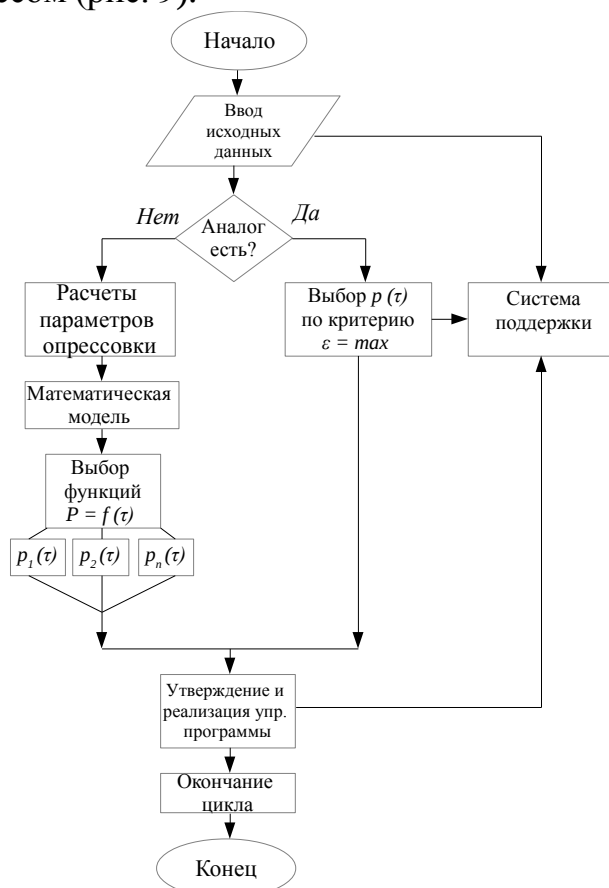


Рисунок 9. Алгоритм автоматизированного управления

Согласно алгоритму управления сначала учитывается температура металла, распределение температуры в стенке формы и давление в гидросистеме.

По результатам сравнения полученных данных с заданными вносятся изменения в закон наложения давления. Закон определяется скоростью наложения давления и величиной накладываемого давления на кристаллизующийся металл. После чего запрессовывается необходимый объем металла для компенсации усадки, в случае необходимости происходит коррекция скорости и величины накладываемого давления.

Результатом реализации разработанного алгоритма, является решение поставленных задач, а именно контроль работы системы управления в режиме реального времени, анализ выполнения технологического процесса и генерация корректирующего управляющего воздействия.

Аппаратная часть реализована на контроллерах ОВЕН в полном соответствии со стандартом ГОСТ Р 51840-2001 (IEC 61131-2), что обеспечивает высокую аппаратную надежность (рис. 10).

Программирование контроллеров осуществляется в среде CoDeSys v.2.3.x., на языке ST.

Окно запуска отработки программы представлено на рис. 11.



Рисунок 10. Внешний вид шкафа управления

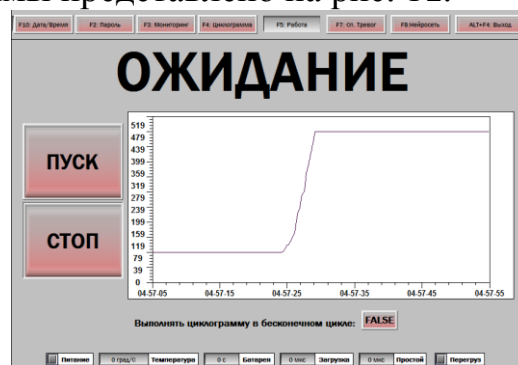


Рисунок 11. Окно работы программы

Разработанная система управления позволяет осуществлять контроль всех требуемых параметров, а также выполнять корректирующие воздействия.

Пятая глава «Исследование процесса программного управления наложением давления на кристаллизующийся металл»

Представлены результаты механических испытаний и структурных исследований опытных отливок сплава В95.

Технологические режимы наложения давления представлены в табл. 1.

Таблица 1. Режимы опрессовки алюминиевого сплава В95

№, режим обработки	Способ обработки	t , с	p , МПа	T_{ϕ} , °C	T_m , °C	$t_{выд}$, с
1	ПКНД	3	500	250	850	60
2	ПКНД	3	400	250	850	60
3	ПКНД	3	200	250	850	60
4	ПКНД	18	500	250	850	60
5	ПКНД	18	400	250	850	60
6	ПКНД	18	200	250	850	60

Обозначения: t – время выхода давления на максимальную величину, p – максимальная величина накладываемого давления, T_{ϕ} – температура формы, T_m – температура металла, $t_{\text{выд}}$ – время выдержки под давлением.

На микроскопических снимках (рис. 12) алюминиевого сплава, кристаллизация которого проходила по третьему и шестому режимам обработки (табл. 1), наблюдается зеренная структура.

При втором и пятом режиме обработки размер зерен уменьшился.

Наложение давления на расплав по первому режиму приводит к образованию еще более гладких зерен. Увеличение давления до 500 МПа и увеличение скорости наложения давления приводит к уменьшению количества литейных дефектов.

Благодаря наложению достаточно высокого давления с высокой скоростью удалось добиться формирования однородной структуры, как у поверхности, так и в центре слитка.

В табл. 2 приведены результаты механических испытаний полученных образцов.

Таблица 2. Механические свойства сплава В95 в зависимости от режима наложения давления

№ образца	№ РНД	Марка алюминия	НВ	σ_B , МПа	Сжимаемость, %
1	1	В95	77	520	12,8
2	2	В95	59	480	11,7
3	3	В95	41	460	2,2
4	4	В95	70	450	12,2
5	5	В95	52	410	7,9
6	6	В95	38	380	1,5

Результаты выполненных исследований, показали, что повышение механических свойств обусловлено формированием структур, не имеющих аналогов в сплавах, применяемых в промышленности. Сплавы с полученными структурами отличаются повышенными физико-механическими свойствами, такими как плотность, твердость и прочность.

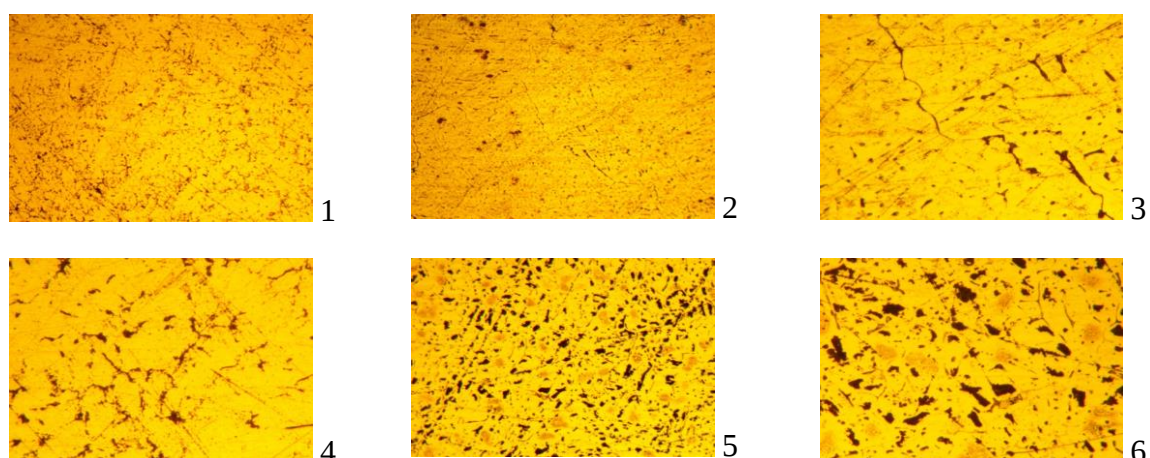


Рисунок 12. Микроструктура алюминиевого сплава В95 после обработки по различным режимам ($\times 200$)

Режимы обработки приведены в таблице 1.

Анализ результатов физико-механических и структурных исследований показал, что разработанная технология обеспечивает общее повышение физико-механических свойств сплава без изменения его химического состава.

На основе исследований выявлены параметры, требующие контроля и управления, разработан подход к автоматизации оборудования.

Установлено, что в зависимости от режима наложения давления на кристаллизующийся металл изменяются физико-механические и структурные свойства конечной металлопродукции, созданная система управления, динамические свойства гидропривода приводит в соответствие с поведением расплавленного металла под давлением.

В заключении приведены результаты выполненных исследований, рекомендации по их практическому использованию и перспективы дальнейшей разработки темы.

В приложениях представлен листинг управляющей программы, акты промышленного использования, акт использования результатов работы в учебном процессе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В диссертационной работе изложены новые научно обоснованные технологические решения, касающиеся разработки автоматизированной системы управления процессом наложения давления на кристаллизующийся металл, позволяющие существенно сократить время и количество энергозатратных подготовительных операций при производстве заготовок из высокопрочных алюминиевых сплавов, что приводит к существенной экономии ресурсов в отрасли и в масштабах всей страны.

2. Применение предложенной методики построения системы управления процессом наложения давления на кристаллизующийся металл позволяет повысить качество проектирования, эффективность расчетов и моделирования технологических процессов наложения давления на кристаллизующийся металл, сократить затраты на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, получить экономию материалов и ресурсов с повышением физико-механических и эксплуатационных свойств выпускаемой продукции.

3. Оценка достоверности результатов работы АСУ процессом программно-корректируемого наложения давления на жидкий и кристаллизующийся металл подтверждается экспериментально, а также актами внедрения промышленных предприятий и образовательного учреждения.

4. В дальнейшем предполагается продолжить исследования процессов формирования структуры и свойств сплавов, накопление экспериментальной информации, создание базы данных и автоматизированной системы

поддержки принятия решений. На основе накопленной информации разработать математическую модель жидкого металла под давлением как многомерного объекта. Создать систему управления формированием свойств сплавов в пространстве переменных состояний в режиме реального времени.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Денисов М. С., Коростелев В. Ф. Автоматизация управления процессом литья с кристаллизацией под давлением / М. С. Денисов, В. Ф. Коростелев // Вестник БГТУ. – 2018. – № 7. – С. 32 – 43.

2. Денисов М. С., Коростелев В. Ф. Автоматизация процесса формирования алюминиевых сплавов в условиях наложения давления на кристаллизующийся металл / М. С. Денисов, В. Ф. Коростелев // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2018. – № 4. – С. 158 – 167.

3. Денисов М. С., Коростелев В. Ф. Управление процессом обработки жидкого металла давлением с помощью адаптивной системы с эталонной моделью / М. С. Денисов, В. Ф. Коростелев // Автоматизация. Современные технологии. – 2018. – № 4. – С. 49 – 58.

4. Коростелев В. Ф., Денисов М. С. Автоматизация управления процессами заготовительного производства / В. Ф. Коростелев, М. С. Денисов // Автоматизация. Современные технологии. – 2019. – № 4. – С. 152 – 158.

Документы на объекты интеллектуальной собственности

5. Пат. 2563398 Российская Федерация. Устройство для изготовления поршней двигателя внутреннего сгорания / Коростелев В. Ф., Хромова Л. П., Клилин В. М., Денисов М. С., Большаков А. Е. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ). – № 2013150436 ; заявл. 12.10.13 ; опубл. 24.08.15.

6. Пат. 2657668 Российская Федерация. Способ управления процессом кристаллизации алюминиевых сплавов при литье под давлением / Коростелев В. Ф., Денисов М. С., Большаков А. Е. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ). – № 2016119724 ; заявл. 20.05.16 ; опубл. 14.06.18.

7. Пат. 180716 Российская Федерация. Устройство для литья с кристаллизацией под давлением / Денисов М. С. ; патентообладатель ООО «Научно-производственное предприятие «СофтАвтоматик». – № 2017129647 ; заявл. 21.08.17 ; опубл. 21.06.18.

8. Пат. РФ 2674543 Российская Федерация. Способ производства поршней двигателей внутреннего сгорания из алюминиевых сплавов / Денисов М. С., Коростелев В. Ф., Хромова Л. П. ; патентообладатель ООО «Научно-производственное предприятие «СофтАвтоматик». – № 2018106985 ; заявл. 22.02.18 ; опубл. 11.12.18.

9. Свид. 2019612923 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа корректируемого наложения давления на кристаллизующийся металл / М. С. Денисов ; правообладатель ООО « Научно-производственное предприятие «СофтАвтоматик». – № 2019611007 ; заявл. 05.02.19 ; опубл. 04.03.19, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

Публикации в других изданиях

10. Korostelev V. F. and Denisov M. S. Crystallization of aluminium alloys under pressure / V. F. Korostelev and M. S. Denisov // MISTAerospace 2018 : IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering 450 (2018) 032012 doi:10.1088/1757-899X/450/3/032012.

11. Denisov M. S. Modeling of Processes of Solidification of Metals under Conditions Imposing Pressure / M. S. Denisov // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 945. – pp. 603 – 610.

12. Denisov M. S. The effect of cooling rate on the crystallization of aluminum alloys under pressure / M. S. Denisov // Nano-Design, Technology, Computer Simulations : 17th International Workshop on New Approaches to High-Tech. – Minsk, Republic of Belarus, 2017. – pp. 6 – 28.

13. Denisov M. S. Effect of cooling rate on the crystallization of aluminum alloys under pressure / M. S. Denisov // Materials Physics and Mechanics 41. – 2019. – pp. 88 – 90.

14. Korostelev V. F. and Denisov M. S. Development of casting process for pressings of pistons of car augmented engines / V. F. Korostelev and M. S. Denisov // Metal Science and Heat Treatment. – 2017. – Nos. 9 – 10, Jan. – Vol. 58.

15. Korostelev V. F., Khromova L. P. and Denisov M. S. Analysis of dependence of the properties of alloy V95 on the pressure applied to crystallizing metal / V. F. Korostelev, L. P. Khromova and M. S. Denisov // Metal Science and Heat Treatment. – 2017. – No. 1 – 2, May. – Vol. 59.

16. Korostelev V. F., Denisov M. S., Bol'shakov A. E., Chan Van Khieu. Development of the Manufacture of Billets Based on High-Strength Aluminum Alloys / V. F. Korostelev, M. S. Denisov, A. E. Bol'shakov, Chan Van Khieu // Russian Metallurgy (Metally). – 2017. – No. 9. – pp. 691 – 695.

17. Korostelev V. F. and Denisov M. S. Automation of pressure imposing on the crystallizing metal / V. F. Korostelev and M. S. Denisov // MISTAerospace 2018 : IOP Conf. Ser. : Mater. Sci. Eng. 537 (2019) 032010 doi:10.1088/1757-899X/537/3/032010.

Подписано в печать _____.

Формат бумаги 60×84 1/16. Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.