

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)

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)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки РФ
Коростелёв Владимир Федорович

Владимир – 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ АТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ЗАГОТОВОК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ	12
1.1 Анализ технологического процесса производства заготовок из высокопрочных алюминиевых сплавов.....	12
1.2 Состояние технологических процессов производства заготовок из высокопрочных алюминиевых сплавов.....	23
1.3 Анализ существующих систем управления технологически процессом литья под давлением	29
1.4 Выводы	38
2. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	40
2.1 Методика исследований.....	40
2.2 Технологическая оснастка для отработки управляющей программы и проведения исследований.....	43
2.3 Разработка аппаратной части автоматизированного комплекса	47
2.4 Выводы	56
3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	58
3.1 Математическая модель исследуемого технологического процесса	58
3.2 Влияние давления на сжимаемость алюминиевых сплавов.....	62
3.3 Моделирование гидронасоса и регулятора давления в составе гидравлической системы	66
3.4 Выводы	79
4. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ НАЛОЖЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА ЖИДКИЙ И КРИСТАЛЛИЗУЮЩИЙСЯ МЕТАЛЛ	80
4.1 Разработка функциональной и структурной схем системы управления процессом	82
4.2 Разработка алгоритма и программы управления.....	93
4.3 Программно-аппаратная реализация АСУ ТП	103
4.4 Выводы	109
5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ НАЛОЖЕНИЕМ ДАВЛЕНИЯ НА КРИСТАЛЛИЗУЮЩИЙСЯ МЕТАЛЛ.....	111
5.1 Анализ результатов физико-механических испытаний заготовок поршней ДВС из высокопрочного алюминиевого сплава.....	111
5.2 Исследование влияние давления на выделение скрытой теплоты кристаллизации	116
5.3 Влияние давления на сжимаемость алюминиевых сплавов.....	119
5.4 Выводы	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	123

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ	124
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	137
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	158
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	159
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	160

ВВЕДЕНИЕ

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 [1]. 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 [2], 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 [3, 4]. Сложным и не управляемым остается процесс сжатия кристаллической решетки до таких пределов, при

которых можно было бы исключить диффузию компонентов по дефектам структуры [5]. 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 [6-8]. 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 технологии 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.

Реализация и внедрение результатов работы

На основе результатов диссертационного исследования реализован проект, являющийся победителем конкурса УМНИК (государственный

контракт №3199ГУ1/2014 от 21.08.2014 и государственный контракт №8647ГУ2/2015 от 16.12.2015), конкурса СТАРТ (государственный контракт 2018ГС1/35289 от 19.07.2017) и конкурса СТАРТ 2 (государственный контракт 2821ГС2/35289 от 21.12.2018). Результаты исследований получили высокую оценку на всероссийских и региональных конкурсах, а именно, победа в конкурсе грантов на проведение научных исследований по приоритетным направлениям развития науки, технологии и техники Владимирской области – 2014; областной конкурс молодежных авторских проектов, направленных на социально-экономическое развитие Владимирского региона – 2015; грант победителю конвейера проектов смены Молодые ученые и преподаватели в области IT-технологий – 2015. Проект удостоен золотой медали ВВЦ-2015, г. Москва.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры «Автоматизация технологических процессов» Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, а также в технологических процессах Научно-производственного центра «ИНОР» (г. Королёв МО) и Владимирского электромоторного завода при производстве деталей для космической и авиационной отраслей, в том числе управляющие программы для наложения давления на кристаллизующийся металл в автоматизированном режиме.

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.

1. ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ АТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ЗАГОТОВОК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

1.1 Анализ технологического процесса производства заготовок из высокопрочных алюминиевых сплавов

В самом начале своего развития литье под давлением решало задачи качественного заполнения формы расплавом и обеспечения высокой производительности труда при массовом производстве. При этом не возникало проблем, связанных с получением прочных и герметичных изделий, и тем более не стоял вопрос об автоматизации данного технологического процесса.

На современном этапе [9] проблемы заполнения формы остаются на втором плане. На передний план выдвигаются проблемы получения заготовок с заданным сочетанием физико-механических свойств. Отличительной особенностью технологии литья под давлением является переход обрабатываемого металла из жидкого состояния в твердое. Этот переход обуславливается изменением объема или усадкой, что, приводит к образованию пор, рыхлот, снижается герметичность, ухудшаются механические свойства получаемых заготовок. Поэтому задачей, требующей решения, является получение заготовок с равномерной, плотной структурой, без дефектов газового и усадочного происхождения. Первые результаты в этой области были отражены в трудах Д. К. Чернова [10], который указал на возможность получения отливок, свойства которых максимально приближены или даже не уступают свойствам заготовок, полученных ковкой. Это становится возможным за счет внешнего воздействия, оказываемого в процессе кристаллизации на отливку давлением поршня, давлением газа, перемешиванием расплава в затвердевающем слитке или полем центробежных сил.

В процессе обзора научно-технической литературы было установлено, что формирование конечных свойств литой заготовки зависит не только от степени влияния внешних воздействий на расплав, но и от особенностей технологического процесса.

В работах [11] показано, что к особенностям технологического процесса относят температуру заливаемого металла, которая, в первую очередь, зависит от конфигурации и размеров отливки, режима заполнения формы и химического состава обрабатываемого сплава. Если использовать значительно перегретый металл, может возникнуть проблема закупоривания вентиляционных каналов пресс-формы, что, в свою очередь, приводит к увеличению газовых включений в отливках, частичному или полному незаполнению формы. Кроме того, перегретый металл способствует увеличению различного рода дефектов; увеличивается время затвердевания и охлаждения отливки, что приводит к снижению интенсивности работы оборудования, увеличивается износ формообразующих поверхностей формы; возрастает вероятность залипания отливки в форме и ее разлома во время выталкивания.

Отсюда, при увеличении размеров отливки и уменьшении толщины стенки металл разогревают до верхнего предела; в случае с массивными отливками простой формы разогрев осуществляется ближе к нижнему пределу.

Было установлено, что помимо температуры заливаемого металла, на результаты технологического процесса, а, следовательно, и на свойства отливки оказывают влияние особенности обработки, которые могут осуществляться с применением динамического [12] или статического давления [13].

Динамическое давление действует в движущемся потоке расплава в процессе заполнения им формы, если он встречает сопротивление. В случае отсутствия сопротивления, давление в потоке определяется сопротивлением воздуха и газов и их противодействием в полости пресс-формы. При относительно небольших скоростях впуска гидродинамическое давление невелико, например, если $U = 15$ м/с среднее гидродинамическое давление при литье алюминиевого сплава 0,6—1 МПа [14].

Статическое давление на затвердевающий металл передается от прессующего плунжера тогда, когда питатель затвердевает после или одновременно с отливкой.

Передача статического давления на отливку называется подпрессовкой [15].

На расчеты необходимого статического давления влияют такие параметры как состав сплава, его свойства, работа системы вентиляции формы, конфигурация и толщина стенки отливки, требования к качеству. Значения статического давления изменяется в пределах от 30 до 300 МПа.

Для получения максимального качества отливки в принцип работы современных комплексов для литья под давлением заложены возможности развивать максимальное давление подпрессовки прессующим механизмом в момент начала кристаллизации отливки, т.е. сразу после процесса заполнения формы, до тех пор, пока питатель не успел закристаллизоваться.

При заполнении формы расплавленный металл подается турбулентным или дисперсным потоком, подпрессовка обеспечивает сжимаемость воздушных и газовых включений в отливке, что способствует повышению физико-механических свойства. Отливки, полученные с использованием данной технологии склонны к вздутию. Их нельзя подвергать термической обработки, т.к. оставшиеся газовые включения подвергаются расширению в порах.

Заполнение пресс-формы ламинарным потоком через объемный питатель с подпрессовкой, уменьшает количество дефектов газо-усадочного происхождения в отливке. Это становится эффективно в случае заполнения пресс-формы твердо-жидким расплавом.

Невысокая скорость заполнения формы и подпрессовка позволяют получать плотные отливки с толщиной стенки от 4 до 9 мм и более. Такой способ обработки может быть использован и при производстве отливок из

высокопрочных, термически упрочняемых алюминиевых сплавов, что существенно расширяет область применения литья под давлением.

Для уменьшения газовой и воздушной пористости при производстве отливок, используется не только повышение давления, накладываемого на кристаллизующийся металл, но и такие технологические подходы как, создание рациональных конструкций литниковой и вентиляционной систем пресс-формы, выбор оптимальных режимов литья, которые заключаются в правильной настройке скорости прессования, температуры расплава и пресс-формы.

Разработаны и используются в производственных условиях так называемые специальные способы литья под давлением, направленные на уменьшение газовой и воздушной пористости в отливках.

Реализация в производственных условиях специальных способов литья связана с дополнительными затратами, усложнением конструкций пресс-форм, машин литья под давлением, а также новыми подходами при организации технологического процесса в целом [16]. Вышеупомянутые затраты окупаются только в том случае, если к изготавливаемым отливкам предъявляются особые требования к качеству.

К специальным способам литья под давлением, которые направлены на уменьшение газо-воздушной пористости в отливках, относятся процессы литья с использованием вакуумирования и регулированием состава газов в полости пресс-формы.

Литературный обзор показал, что величина накладываемого давления на кристаллизующийся металл зависит от размеров, конфигурации и толщины стенки отливки, а также от химического состава сплава [17-19]. Для минимизации в отливках дефектов газо-усадочного происхождения необходимо осуществлять подпрессовку в завершающем цикле прессования. Для этих целей используются специальные механизмы прессования с

усилением (мультипликацией) давления на кристаллизующийся металл в камере прессования прессового оборудования.

Стоит отметить, что эффективность подпрессовки определяется временем нарастания давления (мультипликации), которое должно быть меньше времени кристаллизации отливки в полости формы. В этой связи, современное гидропрессовое оборудование для литья с кристаллизацией под давлением оснащается механизмами подпрессовки с таким быстродействием, чтобы обеспечить время выхода давления на максимальную величину за доли секунды. Если такая подпрессовка реализуется, обеспечивается повышение качества выпускаемых отливок; гарантируется отсутствие дефектов газоусадочного происхождения, высокая плотность, твердость и герметичность.

Литье под давлением с подпрессовкой кристаллизующегося металла по своей физической сущности является процессом наиболее близким к реализации идеи формирования структуры отливок из сильно неравновесных состояний.

Возможности воздействия на процесс формирования отливки, с целью устранения усадочных и газовых пустот при литье под давлением достаточно обширны. Технологические процессы литья с применением давления на затвердевающую отливку, обладают большими резервами повышения качества получаемых изделий. Процессы литья под давлением позволяют в комплексе решить задачи заполнения формы и получения отливок с конфигурацией и размерами, максимально приближающимися к готовому изделию, уменьшая влияние вредного воздействия усадочных процессов на плотность, герметичность и механические свойства отливок.

В ходе обзора было установлено, что наложение давления на кристаллизующийся металл влияет на интервал метастабильности. Давление позволяет перевести расплав в неравновесное состояние. В таком состоянии количество возможных сценариев перехода расплава в твердое состояние

кратно возрастает, в отличие от процессов кристаллизации в условиях, близких к равновесным [20].

Очевидно, что давление позволяет сместить температуру практически всех типов фазовых превращений веществ 1-го и 2-го рода. Величины производных $\partial t^*/\partial p^*$ (где t^* и p^* - температура и давление фазового равновесия соответственно) принимают значения от 0 до $\pm \infty$. Это зависит от термодинамических свойств сосуществующих фаз, температура плавления с ростом давления повышается [21].

Существует закономерность изменения кристаллической структуры под давлением, характеризующаяся увеличением координационного числа [22]. Стоит отметить, что уже установлены некоторые полуэмпирические правила, которые позволяют с высокой долей вероятности прогнозировать структурные и физико-химические свойства простых веществ и соединений, а также эволюцию фазовых диаграмм многокомпонентных систем при наложении изостатического давления [23]. Установлено, что с увеличением давления возрастает вязкость расплава, изменяются физико-механические свойства конечной продукции [24].

Доказано [25], что увеличение скорости охлаждения ($V_{\text{охл}}$) при кристаллизации приводит к изменению строения первичных кристаллов и эвтектических фаз на границах дендритной ячейки. Кроме того, реальные температуры кристаллизации (t_s – солидус и t_l – ликвидус), их принято называть неравновесными, существенно отличаются от справочных (эталонных), называемых равновесными, и что является важным, могут изменяться в зависимости от внешних условий, в частности, от накладываемого давления. Для определения неравновесных величин введена специальная величина - степень метастабильности, которая характеризует величину переохлаждения, на которую можно изменить неравновесные ликвидус и солидус. Степень переохлаждения является функцией скорости охлаждения.

Принципиальная возможность увеличения скорости охлаждения в интервале кристаллизации с целью уменьшения размера дендритного параметра (дендритной ячейки - $d_{яч}$) показана в работе [26]. На рис. 1 приведена зависимость влияния скорости охлаждения на размер дендритной ячейки:

$$d_{яч} = A/V_{охл}^n$$

где A и n – константы для сплава данного состава, причем n находится в пределах от 0,3 до 0,5; $V_{охл}$ – скорость охлаждения сплава.

В логарифмических координатах ($lgd_{яч} - lgV_{охл}$) эта зависимость линейная:

1. $V_{охл} = 10^2 \dots 10^3 \text{ K/c}$ – обычные технологии получения сплавов из массивных слитков или отливок.
2. $V_{охл} = 10^3 \dots 10^5 \text{ K/c}$ – гранульная или порошковая технология получения полуфабрикатов из сплавов на основе Al, Mg, Ni, Fe и Ti.
3. $V_{охл} = 10^6 \dots 10^9 \text{ K/c}$ – чешуйка, тонкая лента, тонкая проволока.

Средний размер частиц фаз и эвтектических проволок на границах дендритных ячеек определяется по формуле:

$$m = kd_{яч}, \text{ где } k - \text{константа.}$$

Отсюда ясно, что $d_{яч}$ – важнейший параметр, определяющий дисперсность структуры литого сплава.

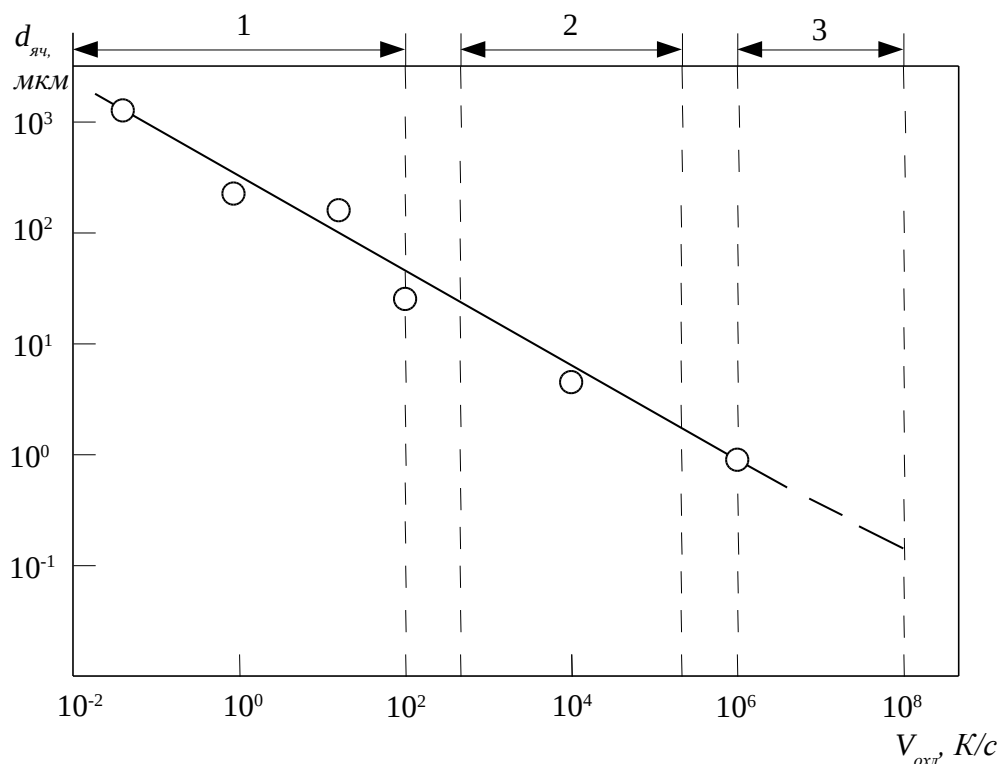


Рисунок 1. Влияние скорости охлаждения на диаметр дендритной ячейки

Одним из наиболее фундаментальных положений теории кристаллизации является представление о взаимосвязи между степенью переохлаждения и характером кристаллического строения.

Кроме того, давление, прикладываемое к кристаллизующемуся расплаву (табл. 1), оказывает влияние на значение таких параметров, как предел текучести и модуль Юнга [27].

Таблица 1. Характеристики алюминия и сплава системы Al-Mg-Sc.

№	Сплав	Способ плавки	Предел текучести, Н/м ²	Модуль Юнга, Н/м ²
1	Al (A99)	Традиционный	$6 \cdot 10^7$	$6,85 \cdot 10^{10}$
2	Al (A99)	Кристаллизация в условиях давления 400 МПа	$7,2 \cdot 10^7$	$9,1 \cdot 10^{10}$

Из доступных источников известно, что давление, накладываемое на кристаллизующийся металл, оказывает серьезное влияние на значение основных теплофизических параметров расплава: температуру плавления, коэффициент теплопроводности, удельную теплоемкость, скрытую теплоту кристаллизации, поверхностное натяжение, плотность, вязкость [28].

Для процессов кристаллизации наиболее существенны изменение двух параметров: температуры плавления и размеров критического зародыша.

В работе [29] показано, как изменяется диаграмма расплава алюминия при кристаллизации в условиях изостатического давления (рис. 2).

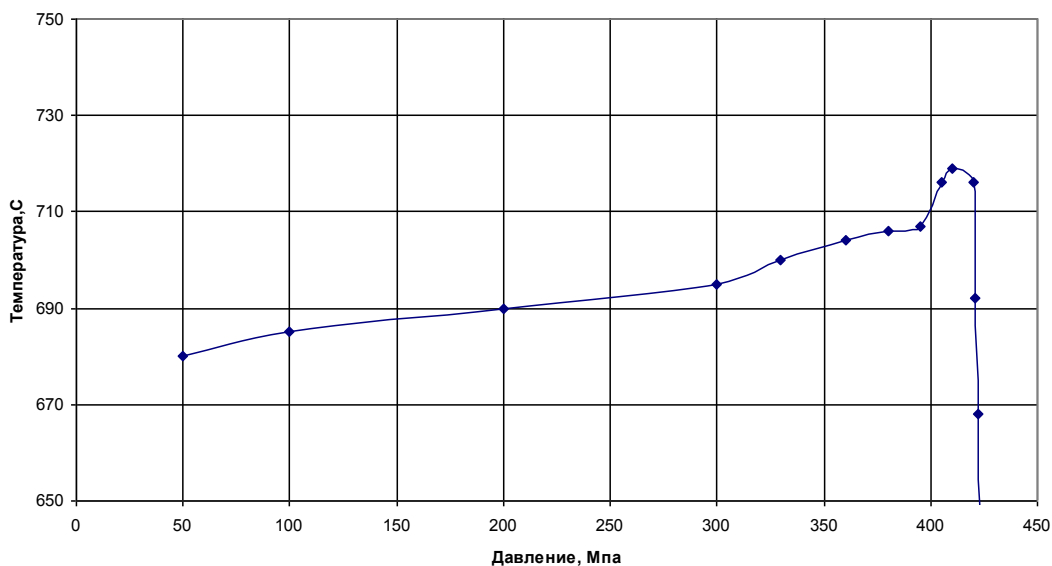


Рисунок 2. p - t диаграмма расплава алюминия при кристаллизации в условиях изостатического давления.

Анализ литературных данных показал [30], что кристаллизация алюминия (А99) в условиях наложения давления напрямую влияет на удельную теплоемкость (рис. 3).

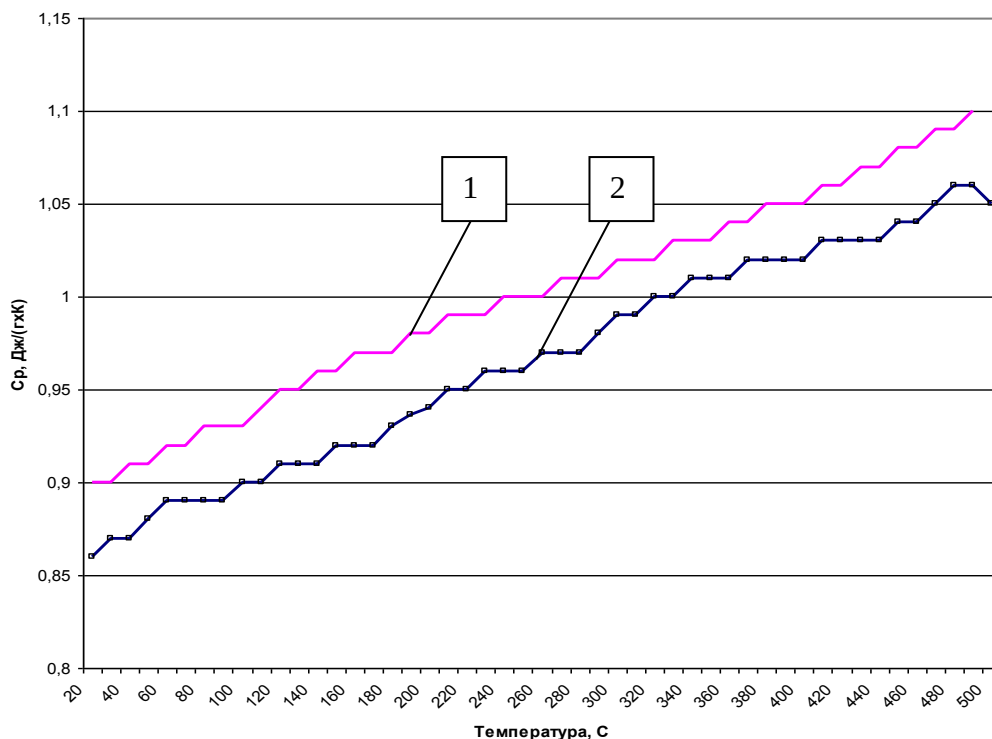


Рисунок 3. Температурная зависимость удельной теплоемкости алюминия А99: 1 – кристаллизация в условиях изостатического давления ~ 500 МПа; 2 – кристаллизация в обычных условиях.

Также обзор помог установить влияние давления на целый ряд важных свойств высокопрочных алюминиевых сплавов [31], химический состав которых приведен в табл. 2.

Таблица 2. Химический состав исследуемых сплавов

Марка сплава, способ выплавки	Химический состав, вес. %						μ , г/моль
	Al	Cu	Mg	Zn	Zr	Mn	
В96Ц Промышленная пл.	86,46	2,3	2,5	8,5	0,14	0,10	31,24
В96Ц под давлением ~ 400 МПа	86,24	2,28	2,38	8,7	0,14	0,26	31,37

Влияние давления на удельную теплоемкость (c_p) сплава В96Ц представлены на рис. 4, 5.

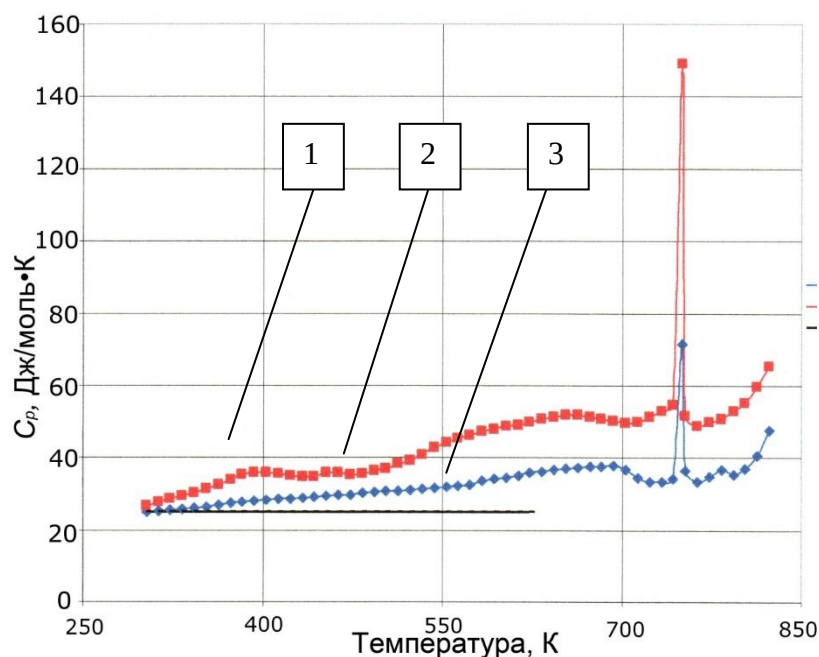


Рисунок 4. Теплоемкость сплава В96Ц, полученного по традиционной технологии (2) и технологией литья под давлением (1)

Обозначения: прямая линия (3) соответствует закону Дюлонга и Пти.

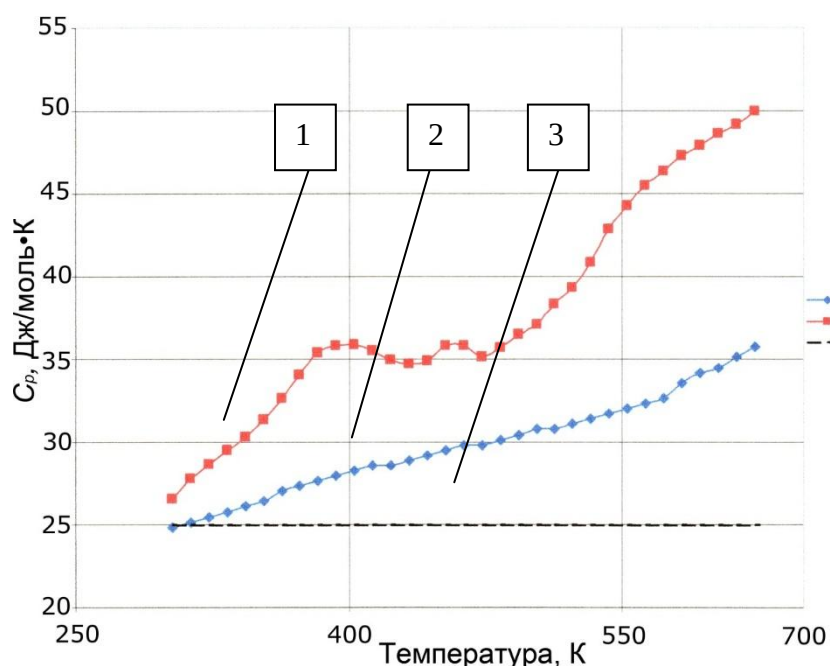


Рисунок 5. Теплоемкость сплава В96Ц, полученного по традиционной технологии (2) и технологией литья под давлением (1)

Обозначения: прямая линия (3) соответствует закону Дюлонга и Пти.

В исследованиях авторов также приведены результаты измерения микротвердости табл. 3.

Таблица 3. Результаты измерения микротвердости исследуемых сплавов

Марка сплава, способ выплавки	Микротвердость (HV), кгс/мм ² (измерение при температуре 20 °С)		
	Исх. состояние	Закалка от 120 °С	Закалка от 550 °С
В96Ц. Промышленная пл.	170	175	140
В96Ц. Под давлением ~ 400 МПа	178	183	202

1.2 Состояние технологических процессов производства заготовок из высокопрочных алюминиевых сплавов

Одним из эффективных направлений в решении проблемы гарантированного повышения структурных и функциональных свойств сплавов при одновременном снижении энергетических и материальных затрат на их производство является разработка новых процессов, в частности, процессов с использованием внешних воздействий на жидкий или кристаллизующийся металл [32].

Несмотря на многообразие способов, и условий воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл, формированием структуры управляют законы фазовых превращений [33].

Как известно [34], фазы существуют в различных агрегатных состояниях, имеют различный состав и структуру. Поэтому, получение равномерной, мелкозернистой структуры с использованием атомно-молекулярных элементов и синтез из них более крупных систем, является задачей разрабатываемых на сегодняшний день технологий и систем управления данными технологическими процессами.

Идея управления формированием структуры и прогнозирования качества выпускаемой продукции возможно еще достаточно длительное время оставалась не востребованной, если бы не финансовые убытки, которые испытывают обрабатывающие предприятия. На сегодняшний день 20% выпускаемой литой продукции подлежит повторному переплаву [35]. Такое состояние дел приводит к отставанию, а значит и к потере

конкурентоспособности отечественной промышленности по сравнению с зарубежными производствами.

Детали ответственного назначения, например, поршни для двигателей внутреннего сгорания, изготавливаются с применением большого количества заготовительных, подготовительных и основных операций, требующих, не оправдано больших материальных затрат [36].

Достижение конкретного технического результата, а именно, получение однородной, мелкозернистой, деформируемой структуры металла с заданным направлением расположения волокон во всем объеме получаемого изделия, достигается способом, включающем получение заготовки, предварительную штамповку и окончательную штамповку в штампе. Перед штамповкой осуществляют протяжку свободной ковкой, далее заготовку формируют в двойной усеченный конус и осаживают в формовочном штампе, а уже после осадки формируют текстуру металла обратным прессованием со степенью деформации не менее 40% [37, 38].

Кроме вышеперечисленных методов сегодня широко применяются и другие технологии для получения деталей ответственного назначения. На примере изготовления заготовок поршней ДВС, приведены сравнительные характеристики этих методов.

Таблица 4. Сравнительные характеристики методов получения заготовки поршня

Характеристики поршня	Литье в кокиль	Изотермическая штамповка	Жидкая штамповка	Результат
Прочность, МПа	230 – 245	320 – 360	270 – 300	Повышение прочности, снижение размеров и веса
Твердость, НВ	95 – 110	120 – 135	115 – 125	Увеличивает износостойкость
Пористость, баллы	1 – 2	0	0	Стабильность размеров, снижение «роста»

Зазор в сопряжении «поршень – гильза»	100%	70%	60%	Уменьшение: вредных объемов, шума, выброса твердых частиц
---------------------------------------	------	-----	-----	---

Наиболее близкими к предлагаемому процессу являются процессы изотермической, горячей и жидкой штамповки.

В табл. 5 представлены более подробно результаты обзора механических испытаний поршней в зависимости от технологии их изготовления.

Таблица 5. Механические свойства сплава АК4-1 и АЛ-25

Состав, способ изготовления поршней	Температура испытаний, °С	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Твердость		
					Кратковременная твердость ($\tau=30c$)	Длительная твердость ($\tau=1$ час)	При $t=20^\circ C$ после различных температур испытания
АК4-1, горячая штамповка	20	450	350	14,2	136 – 138	136 – 135	
	100	430	350	14,8	124 – 126	120 – 119	135
	200	360	325	9,6	118 – 116	110 – 108	135
	300	155	150	12,0	55 – 54	20 – 19	107
	400	40	38	32,4	20 – 19	9 – 8	66
АЛ-25, штамповка жидкого сплава	20	250	215	1,2	107 – 104	101 – 99	
	100	220	195	1,2	94 – 96	85 – 83	102
	200	190	180	2,0	79	59 – 58	96
	300	130	120	4,0	50 – 48	32 – 30	93
	400	50	40	9,6	26	16 – 13	87

На рис. 6 показана одна из схем пуансонного прессования [39] при литье с кристаллизацией под давлением (ЛКД).

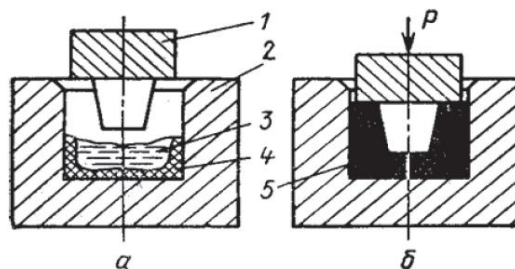


Рисунок 6. Схема пуансонного прессования при ЛКД:

a – перед внедрением пуансона; *б* – выдержка под давлением; 1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – расплав; 4 – затвердевшая корка; 5 – отливка

С использованием специальной оснастки (рис. 7), авторам удалось изучить изменения температуры по сечению вертикальной корки. Установлено, что имеет место довольно большой температурный перепад по толщине стенки. Если в момент окончания формообразования отливки величина перепада мало изменяется в зависимости от толщины стенки ($X_{от}$) и состава сплава, находясь в пределах 30...40°C, то в момент окончания затвердевания перепад заметно повышается (табл. 6). При этом, чем больше содержание кремния в силумине (при постоянной толщине стенки отливки) и толще стенка (при постоянном составе сплава), тем больше величина температурного перепада (dt) по толщине стенки. В таких случаях принято говорить о последовательном характере затвердевания отливок.

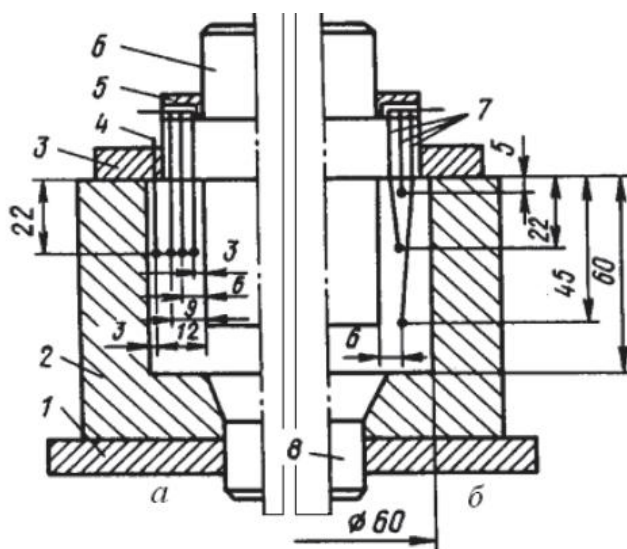


Рисунок 7. Схема установки термопар в полости пресс-формы: *a* – по высоте стенки; *б* – по поперечному сечению стенки; 1 – нижняя плита; 2 – матрица; 3 – кольцо съемника; 4, 7 – термопары; 5 – промежуточное кольцо; 6 – пуансон; 8 – толкатель

Таблица 6. Температурные перепады (δ_t), время затвердевания (τ_3) отливок и значения коэффициентов затвердевания при росте корки со стороны матрицы и пуансона (K_1, K_2)

Металл, сплав	$X_{отз}$, мм	δ_t , °C	τ_3 , с	K_1/K_2 , мм/с ²
АЛ7	10	110...118	5,0...5,2	0,205/1,033
АК7ч (АЛ9)	10	120...125	5,5...5,7	0,160/0,661
АК18	10	125...130	6,1...6,5	0,102/0,448
АК12 (АЛ2)	5	-	-	0,625/0,625
	10	120...125	5,7...6,0	0,170/0,580
	15	130...135	6,7...7,1	0,170/0,420
	20	150...153	8,0...8,3	0,170/0,320

Также известны и другие схемы прессования с простыми пресс-формами как показано на рис. 8

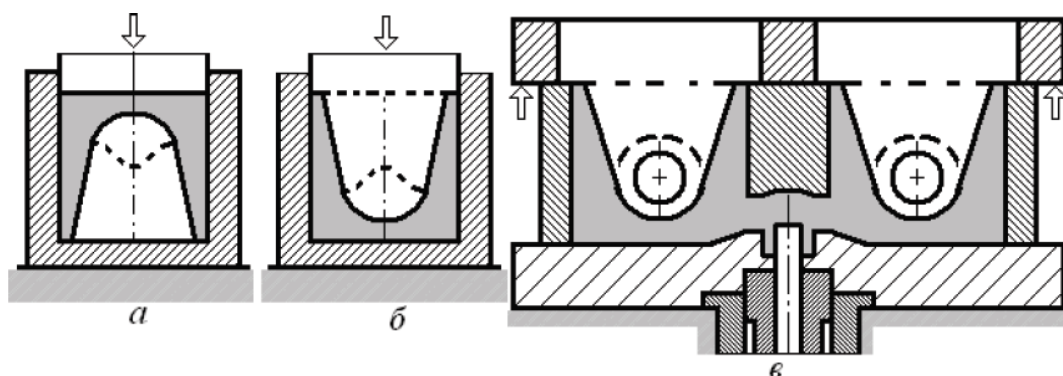


Рисунок 8. Схемы изготовления поршней при поршневом (а), пуансонном (б) видах прессования и через литники-питатели (в).

Матрицы пресс-форм (рис. 8, а, б) являются неразъёмными, здесь только один разъём – между матрицей и прессующим пуансоном. При прессовании через литники-питатели расплав вначале заливают в металлоприёмник, из которого его вытесняют нижним прессующим пуансоном; в этом случае пресс-форма может иметь разъёмы как вертикальный, так и горизонтальный. На рисунке 8, в показана схема пресс-формы с горизонтальным разъёмом (показано стрелками), в которой одновременно могут быть изготовлены две отливки.

Более удачная схема прессования (рис. 8, в) реализована в промышленной установке, разработанной фирмой *UBE* (Япония), схема работы которой представлена на рис. 9.

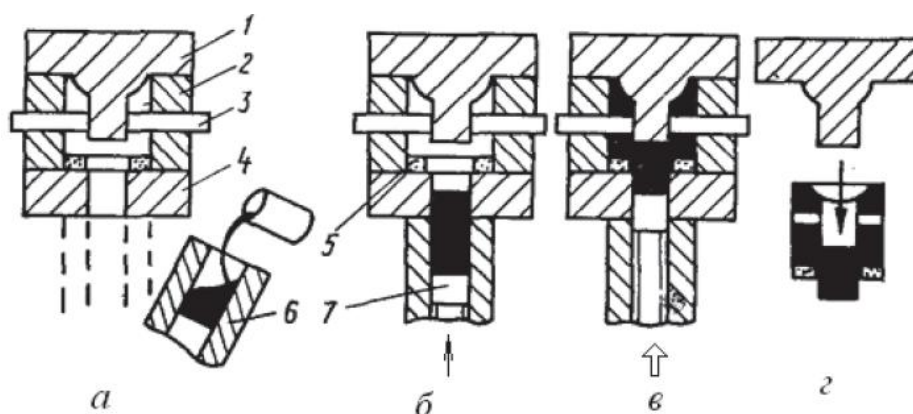


Рисунок 9. Изготовление поршней способом ЛКД на литейной машине с нижним узлом прессования: *а* – заливка металлического расплава в металлоприемник; *б* – начало вытеснения расплава из металлоприемника в матрицу; *в* – уплотнение затвердевающей отливки; *г* – съем отливки с верхней полуформы; 1, 2, 4 – детали пресс-формы; 3 – стержень; 5 – керамическая вставка; 6 – металлоприемник; 7 – пуансон (плунжер).

В технологических процессах, приведенных выше, режимы ЛКД устанавливаются опытным путем в каждом конкретном случае, поэтому приведенные авторами рекомендации носят слишком общий характер.

В табл. 7 приведены механические свойства поршней, изготовленных литьем в кокиль и ЛКД с использованием поршневого и пуансонного прессования (рис. 8, *а*, *б*). Видно, что отливки, изготовленные способом ЛКД, имеют более высокие механические свойства в интервале температур 20...300°C.

При ЛКД используют преимущественно металлические (стальные) формы, поэтому формирование отливок протекает в условиях повышенных скоростей охлаждения. Время затвердевания отливки сокращается в 3...4 раза по сравнению с литьем в кокиль, ширина двухфазной зоны при литье сплавов с широким интервалом кристаллизации уменьшается.

Таблица 7. Механические свойства поршней

Сплав	Способ литья	Термическая обработка	Температура испытаний, °C	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
AK12M2MgH	Литье в		20	220	220	0,2

(АЛ25)	кокиль	Т6	200	190	185	0,4
			300	115	110	1,0
			350	60	55	4,8
	ЛКД		20	330	315	0,5
			200	240	225	1,9
			300	125	115	13,5
			350	60	55	27,5

В указанных работах расплав (жидкий металл) рассматривается как открытая система, обменивающаяся энергией и энтропией с внешней средой. Подобная система далека от термодинамического равновесия. Она развивается в направлении стационарного состояния, где генерация энтропии сводится к минимальному значению, т.е., система старается, свести к минимуму свои энергетические потоки, функционируя на предельно близком расстоянии к равновесию. В таком случае данные процессы описываются линейными уравнениями.

Обзор не выявил математического описания конкретных динамических систем и тем более металлических систем. Это не создает условий для дальнейшего развития теории кристаллизации. В этой связи ставится задача получения и накопления достоверной эмпирической информации.

1.3 Анализ существующих систем управления технологически процессом литья под давлением

Процесс наложения давления на кристаллизующийся металл представляет собой сложный физический процесс. До конца не ясно, как давление влияет на взаимное расположение атомов в кристаллической решетке, по каким законам протекают термодинамические процессы. Предполагается, что для накопления знаний и изучения закономерностей поведения жидкого металла под давлением в системе управления процессом необходимо предусмотреть достаточно полное информационное обеспечение, включающее визуализацию и контроль следующих параметров:

- температура формы и металла;
- перемещение основных исполнительных элементов оборудования;

- величина накладываемого давления;
- скорость наложения давления и время выдержки под давлением,

Кроме того, необходимо обеспечить высокопроизводительные вычислительные возможности для обработки информации и принятия решений в режиме реального времени.

Управление формированием структуры и свойств может быть осуществлено на основе новой концепции, учитывающей новые зависимости и закономерности режимов наложения давления.

Переход от равновесной кристаллизации, влечет за собой изменение физико-химических и механических свойств металлопродукции, а управление процессом с использованием современных средств контроля и управления может обеспечить формирование конечной структуры с вполне определенным сочетанием упругих, прочностных и пластических свойств [40].

В этой связи стоит отметить, что нарастание давления с различными сценариям создает предпосылки для обеспечения новых сочетаний физико-механических и структурных свойств металлов и сплавов, а также, при обеспечении наложения относительно высокого давления на расплав, обеспечить рост температуры плавления и характеристик плавления, соответствующих фазовому переходу 1 рода [41-43]. Однако достоверные данные о практической реализации теоретических предпосылок отсутствуют. Возможности давления еще не изучены, так как не разработаны способы наложения давления величиной более 500 МПа, применительно к получению не только лабораторных образцов, но и заготовок промышленного назначения.

На сегодняшний день уже высказываются идеи по изготовлению материалов, сплавов и устройств на атомном или молекулярном уровне [44]. При этом, для реализации таких возможностей необходимо создание нового класса технологий, оборудования, систем управления оборудованием и измерительной аппаратуры, которая необходима для контроля процесса на молекулярном уровне.

В современных производственных условиях (рис. 10), в зависимости от конкретных условий производства, управление качеством отливок осуществляется на трех различных уровнях [45-47].

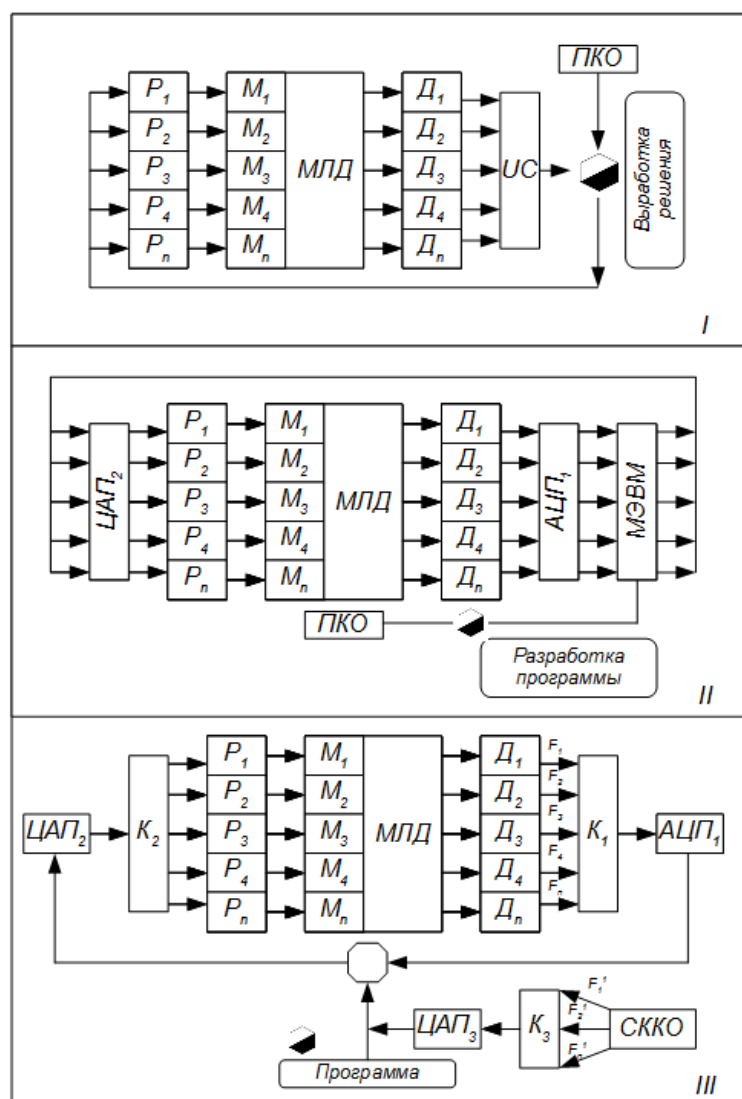


Рисунок 10. Структура автоматизированных систем управления

На первом уровне механизмы M_1-M_n машины литья под давлением (МЛД) оснащаются системой преобразователей D_1-D_n контроля параметров технологического процесса, показания которых регистрируются на измерительном стенде ИС, и регуляторами $P_1 - P_n$ этих параметров. Обычно это регуляторы скорости прессования и подпрессовки, продолжительности выдержки отливки в форме, температуры заливаемого сплава, пресс-формы и пресс-камеры (P_1-P_n).

На основе заключения о показателях качества отливки (ПКО) оператор

принимает решение о необходимости внесения изменений в тот или иной параметр технологического процесса. Оператор регулирует работу соответствующих механизмов $M_1—M_n$ машины литья под давлением или литейного комплекса. Такой подход к управлению качеством отливок наиболее обоснованный для условий серийного производства, когда в работе присутствует большая номенклатура выпускаемых деталей.

На следующем (втором) уровне машины литья под давлением оборудуются, помимо контрольно-измерительной системы, контролирующей параметры технологического процесса, микро-ЭВМ. Наличие микро-ЭВМ для управления регуляторами и распределителями механизмов комплекса позволяет реализовать оптимизацию параметров технологического процесса по их отклонению от заданных.

При таком подходе, основываясь на статистической обработке результатов контроля качества выпускаемых отливок, разрабатываются математические модели, которые связывают показатели качества и параметры технологического процесса. Управляющие программы разрабатываются на основе таких математических моделей. Микро-ЭВМ, получая информации от датчиков $D_1, D_2, \dots, D_n$ параметров технологического процесса, через коммутатор и аналого-цифровой преобразователь АЦП₁ по программе вырабатывает решение о необходимости изменения того или иного параметра и через коммутатор и ЦАП₂ передает управляющий сигнал на регуляторы $P_1, P_2, \dots, P_n$ исполнительного механизма машины, например, на регулятор скорости механизма прессования машины.

Данный подход для автоматизации процесса управления наиболее эффективен в условиях крупносерийного и массового производства.

На третьем, уровне (высшем) система управления включает измерительную систему, в которой сигналы от преобразователя параметров технологического процесса $F'_1 — F'_n$ поступают в коммутатор K_1 , а затем в АЦП₁ и далее в управляющую ЭВМ, обслуживающую все комплексы литья под

давлением. Система контроля качества отливки (СККО) вырабатывает численные значения функций $F'_1 — F'_n$ — показателей качества от параметров технологического процесса (целевая функция) и через коммутатор K_3 и АЦП₃ передает в ЭВМ. ЭВМ на основе программы и математической модели технологического процесса, связывающей целевую функцию, постоянные и переменные (регулируемые) параметры процесса литья под давлением, вырабатывает наиболее оптимальные значения регулируемых параметров и через систему обратной связи, включающую коммутатор K_2 и ЦАП₂, передает управляющий сигнал на систему регуляторов $P_1 — P_n$, воздействуя соответствующим образом на исполнительные механизмы литейного комплекса.

Нужно сказать, что системы первого уровня, имеют значительный недостаток, что, в первую очередь, связано с простотой их исполнения. Такие системы способны осуществлять контроль уже готового изделия, в то время как, в процессе внесения изменений в управляющую программу или технологический режим будет продолжаться выпуск некачественной продукции.

В то же время, проектирование и создание систем второго и третьего уровней требует решения целого ряда научно-технических задач. В первую очередь это связано с созданием надежных и быстродействующих исполнительных механизмов литейных комплексов (механизмов запирания и прессования вспомогательных устройств, приборов управления исполнительными механизмами машины и преобразователей контроля параметров технологического процесса). Не менее важная задача состоит в разработке быстродействующих и надежных систем автоматического контроля и управления качеством отливок.

Автоматизация управления технологическим процессом литья под давлением с использованием систем второго и третьего уровней требует создания математических моделей процесса, связывающих показатели качества

отливок и параметров технологического процесса.

В ходе литературного обзора были установлены попытки регулируемого изменения свойств отливок на машинах литья под давлением за счет управления изменениями температуры пресс-формы и регулирования скорости пресс-поршня.

Авторами [48] разработана система управления машиной литья под давлением. Блок-схема системы управления представлена на рис. 11.

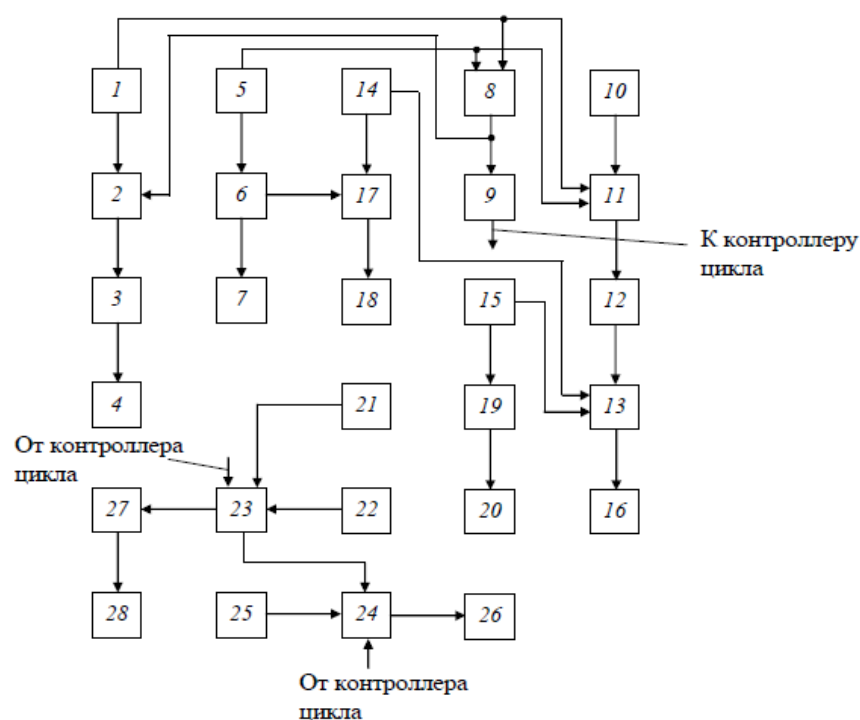


Рисунок 11. Блок-схема системы управления машиной литья под давлением

Обозначения:

- 1 – датчик температуры пресс-формы;
- 2, 8, 11, 23 – вычислительный блок;
- 3, 6, 9, 12, 17, 19, 22, 24, 27 – регулятор;
- 4, 7, 16, 18, 20, 26, 28 – исполнительный механизм;
- 5 – датчик температуры заливаемого металла;
- 10 – фотоэлектрический датчик (измерение скорости прессования);
- 13 – блок умножения,
- 14 – датчик температуры рабочей жидкости,

15, 21, 25 – датчик давления.

Авторы утверждают, что использование системы позволяет осуществить регулирование с более высокой точностью, что приводит к увеличению производительности за счет снижения возврата отливок на 15 %, увеличению выхода, годного на 0,5 %.

Недостатком заявляемой системы является отсутствие алгоритмизации заявляемой системы и применение не стандартных программируемых логических контроллеров (ПЛК).

В этой связи, стремление к автоматизации процессов литья под давлением, расширение области их применения для максимального использования основных достоинств процесса: повышенная плотность изделий, высокие прочностные характеристики при изготовлении объемных тонкостенных деталей, получение точных изделий с высоким качеством поверхности при достаточной производительности процесса, привело к необходимости управления кристаллизацией отливок и внедрению современных средств автоматизации технологических процессов [49].

Кроме того, системы управления технологическими процессами (СУТП) литья под давлением имеют иерархическую систему, где каждый определенный уровень иерархии выполняет свои, строго определенные задачи управления, связанные с задачами управления на том или ином уровне, автоматизированные технологические процессы (АТП) литья под давлением входят в состав сложных производственных процессов (ПП).

Возрастающие темпы производства заготовок из высокопрочных алюминиевых сплавов приводят к росту технологических параметров, которые необходимо контролировать, а значит, к усложнению ТП в целом как объекта управления.

К технологическим параметрам, требующим контроля, относятся: температура заливаемого металла, температура формы, скорость наложения

давления, величина накладываемого давления в каждый момент времени, время выдержки под давлением [50-52].

Стоит отметить, что на сегодняшний день высокопроизводительные вычислительные средства позволяют реализовать достаточно сложные алгоритмы управления в АСУ ТП, это даёт возможность утверждать, что программные АСУ ТП являются сложившимся направлением в автоматическом управлении технологическими процессами [53-56].

Обработка металла давлением в процессе кристаллизации обеспечивает массовое производство деталей ответственного назначения одинакового размера и качества для нужд перспективных отраслей машиностроения с наименьшими затратами времени и труда. Такая технология имеет целый ряд преимуществ перед другими способами в отношении производительности и экономии металла, поскольку в результате наложения давления более 500 МПа с высокой скоростью на кристаллизующийся металл, можно исключить из цепочки технологического процесса энергозатратные операции, такие как термическая обработка, ковка, волочение и т.д. Кроме того, наложение давления сопровождается изменением физико-механических и эксплуатационных свойств конечной продукции, что можно использовать для получения деталей с новыми свойствами из новых сплавов, обладающих повышенной прочностью, твердостью, высокой износостойкостью и т.д.

Ставится задача правильного учета закономерностей процессов формирования конечной продукции, связанных с качеством получаемых деталей и заготовок. Необходимо решить задачу производства высококачественной продукции со стабильными, прогнозируемыми свойствами за счет автоматизации управления процессами, происходящими в интервале температур от температуры заливки до температуры солидус. Решение сложившихся проблем становится на данном этапе развития производства важнейшим условием дальнейшего прогресса и развития. Анализ научно-технической литературы показал, что вопросы автоматизации

управления формированием свойств конечной продукции проработаны недостаточно, и, как показывает теория формирования металлов и сплавов, это управление возможно только на основе эффективного использования современного информационного, метрологического и организационного обеспечения [57-59].

Возможность изменения режимов наложения давления предоставляет качественно новые и, что особенно важно подчеркнуть, технологически реализуемые возможности управления формированием свойств конечной продукции, за счет фазовых превращений в широком интервале температур [60].

Аналогично тому как при литье под давлением на машинах с горизонтальной холодной камерой прессования контролируют и величину давления, и скорость ее изменения и при этом решают проблему заполнения пресс-формы металлом, так и при литье под давлением с заполнением формы сплошным ламинарным потоком с локальной подпрессовкой, а также при жидкой штамповке отливок не только из литейных, но и из деформируемых сплавов возможность улучшения структуры и повышения свойств зависит от контроля, регулирования и управления тепловыми процессами, от управления заполнением форм и их вакуумированием, от управления наложением давления на жидкий и кристаллизующийся металл.

Вопросы программного управления сложными технологическими процессами давно обсуждаются [61-69]. Например, С.С. Одинг и И.А. Кретов, в своей работе [70] предлагают алгоритм, учитывающий отклонение параметров химического состава заготовки, от параметров, заложенных в имитационную модель, позволяющей корректировать программу наложения давления непосредственно в ходе формообразования детали. Однако в своих работах сравнения проводились с параметрами, заложенными в имитационную, а не в математическую модель.

Общий анализ систем с программным управлением технологическими

процессами литья проводили Н.В. Антонов, В.А. Терехов, И.Ю. Тюкин [71].

Такие ученые, как Житников Ю. З., Затонский А.В., Егоров С.В., Кузин Р.Е, Александровский Н.М. в своих работах [72] отмечают актуальность систем с программным управлением и отмечают, что подобные СУ применяются для управления различными технологическими процессами.

Совершенно очевидно, что дальнейшее совершенствование современных процессов литья под давлением должно базироваться на управлении процессом формирования кристаллизующегося металла, с целью получения качественной отливки [73].

Проведенный обзор [74-96] и анализ научно-технической литературы, позволил сформулировать основные цели и направления для разработки АСУ гидравлическим прессом, выполняющим операции литья с кристаллизацией под давлением, а также сформулировать объект исследования.

На основе выполненного анализа методов управления сложными производственными процессами, обзора современных систем управления и особенностей обработки жидкого и кристаллизующегося металла давлением выявлена целесообразность разработки автоматизированной системы управления процессом наложения давления на кристаллизующийся металл.

Сформулированы цели и задачи исследования, определен объект управления.

1.4 Выводы

1. Установлено [27-31], что входными параметрами процесса литья заготовок из высокопрочных алюминиевых сплавов являются температура металла, температура формы, химический состав обрабатываемого металла или сплава.

2. Показано [34-38], что выходными параметрами процесса являются производительность, отсутствие дефектов, повторяемость и прогнозируемость физико-механических свойств заготовок.

3. Доказано [39-47], что управляющими воздействиями для процесса являются температура формы и температура заливаемого металла, величина накладываемого давления, скорость наложения давления, время выдержки под давлением.

4. Утверждается [48-73], что за счет контролируемого наложения давления на кристаллизующийся металл становится возможным управлять процессом формирования физико-механических свойств металлопродукции.

2. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Автоматизация управления процессом литья с наложением контролируемого давления на жидкий и кристаллизующийся металл связана с повышением качества конечной продукции, увеличением производительности, снижением затрат на подготовительные и вспомогательные операции, за счет использования разработанной методики исследования процесса как объекта управления, проектирования и создания соответствующего технологического и информационного обеспечения, с созданием автоматизированной системы управления.

2.1 Методика исследований

В представленной работе давление используется как фактор, который воздействуя на процесс кристаллизации, вместе с такими параметрами как концентрация легирующих элементов, температура и время обеспечивает определенный механизм кристаллизации [97]. Данное предположение нашло свое подтверждение в проведенных ранее исследованиях, результаты которых занесены в табл. 8 и представлены на рис. 16 (*а, б, в*). Полученные результаты совершенно ясно отражают влияние давления на предел прочности получаемых заготовок. Образцы, полученные без использования давления или при минимальных значениях давления (200 МПа), существенно уступают по своим прочностным характеристикам образцам, полученным при максимальном давлении (500 МПа).

Таблица 8. Значения предела прочности (σ_b) литого сплава В95, полученного с наложением давления p при кристаллизации.

p , МПа	σ_b , МПа
0	90
200	193
300	199
400	199
500	220

Микроструктура литого сплава, полученного без наложения давления при кристаллизации, показана на рис. 16, *а*. Для сравнения на рис. 16, *б* приведена микроструктура сплава В95 после прокатки, а на рис. 16, *в* – в литом состоянии с кристаллизацией под давлением 500 МПа.

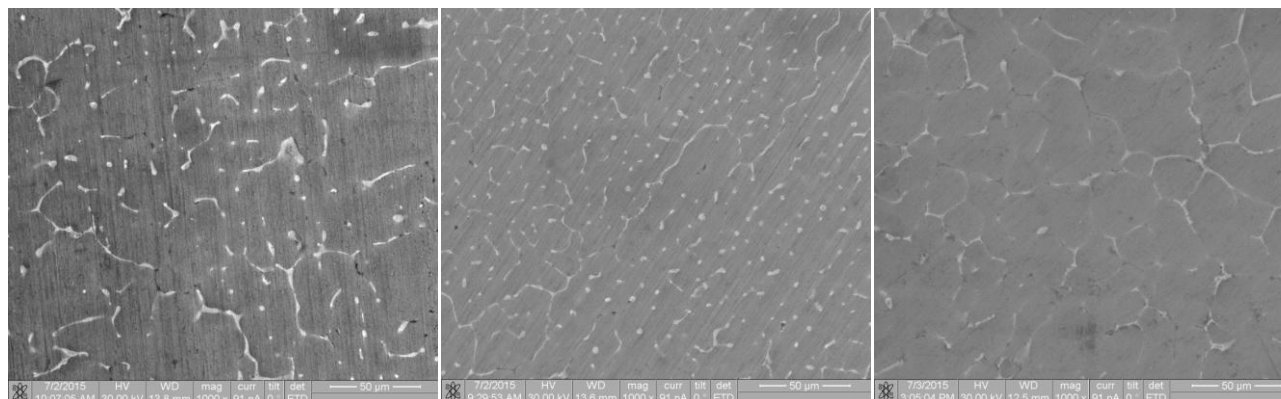
*а)**б)**в)*

Рисунок 16. Микроструктуры алюминиевого сплава В95 ($\times 1000$).

Обработка результатов показала зависимость структуры и механических свойств алюминиевого сплава от величины накладываемого давления.

Полученные результаты позволили разработать методику исследований и определить режимные параметры процесса в диапазоне от 0 до 500 МПа.

Для исследований используется широко применяемый в промышленности высокопрочный алюминиевый сплав В95.

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 записания пресс-формы 300 тс (рис. 17).

Технологический комплекс представляет собой гидравлическую машину для литья с кристаллизацией под давлением, с горизонтальным расположением основных силовых агрегатов.



Рисунок 17. Общий вид гидравлического пресса

Пресс спроектирован и изготовлен как гидроагрегат, состоящий из четырех гидроцилиндров; мультипликатора и клапана высокого давления.

Неподвижная плита пресса усилена подвижным блоком, в который входят две плиты, гильзы и встроенный гидроцилиндр, придающий необходимую жесткость. Перемещение подвижного блока осуществляется по колоннам.

С помощью телескопических гидроцилиндров осуществляется подвод рабочей жидкости в подвижный блок. Гидросистема пресса разведена гнутыми патрубками из нержавеющей стали [98].

Технические характеристики пресса и основные параметры процесса приведены в табл. 9.

Таблица 9. Технические характеристики пресса и основные параметры процесса

№	Параметры	Обозначения	Значение
1	Температура заливки металла	°С	850
2	Начальная температура формы	°С	250
3	Давление на кристаллизующийся металл	МПа	100...500
8	Диаметр отливки	мм	90
9	Высота отливки	мм	70
10	Диаметр прессующих плунжеров	мм	30
11	Ход правого прессующего плунжера	мм	150
12	Ход левого прессующего плунжера	мм	125
13	Ход мультипликатора	мм	250
14	Усилие, прикладываемое к прессующим плунжерам	МН	0,3
15	Усилие запираания формы	МН	3
16	Ход плиты, необходимый для раскрытия формы	мм	250

Схема электрических подключений имеет вид (рис. 18) и включает электрогидравлические переключатели (P1-P11), обеспечивающие подачу рабочей жидкости в соответствующий гидроцилиндр или ее слив. Имеются фильтрующие элементы (Ф1 и Ф2), которые в случае образования засора об этом сигнализируют.

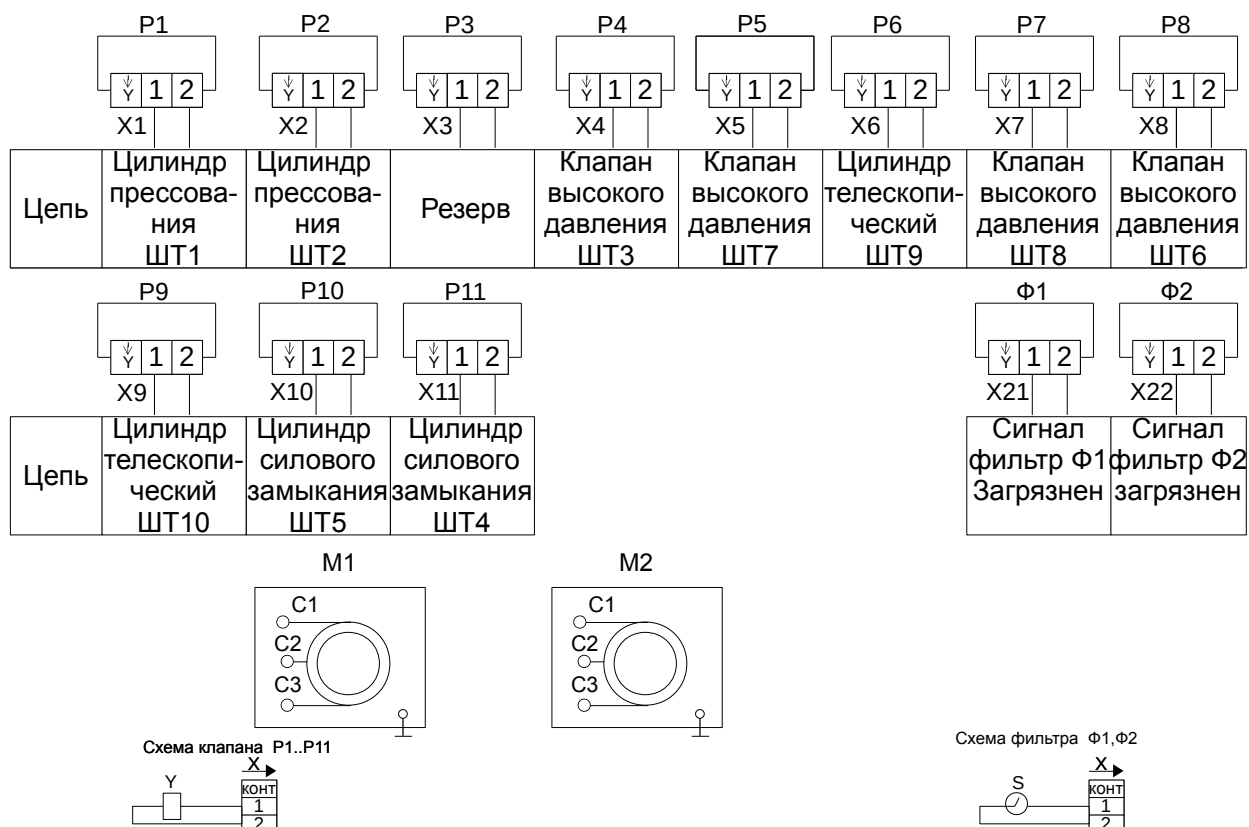


Рисунок 18. Схема электрических подключений

2.2 Технологическая оснастка для отработки управляющей программы и проведения исследований

Спроектирована и изготовлена технологическая оснастка для отработки управляющей программы и проведения исследований (рис. 19а, 19б). Изготавливаемый цилиндр Ø90x70 является альтернативой прокату соответствующего диаметра и имеет минимальные технологические уклоны и припуски на механическую обработку.

Использование выбранного оборудования и технологической оснастки позволяет изготавливать опытные образцы заготовок поршней ДВС из высокопрочного алюминиевого сплава В95.

Выплавка металла осуществляется в муфельной печи сопротивления мощностью 9 кВт, в графитовом тигле под слоем флюса. По ходу плавки температура в печи контролируется платиноводородно-платиновой термопарой с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$.

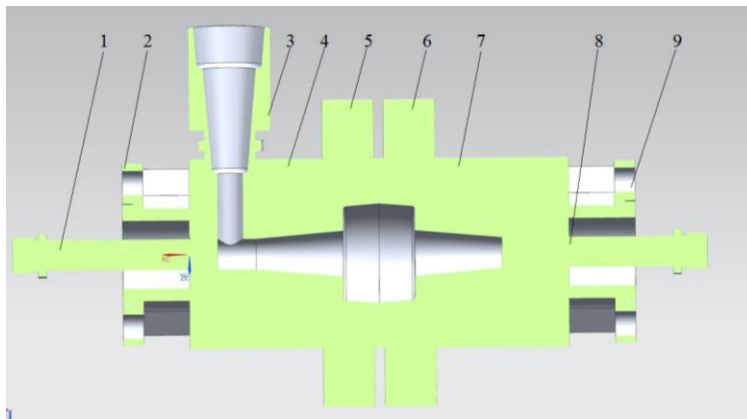


Рисунок 19а. Модель изготовленной технологической оснастки для производства заготовок поршей ДВС

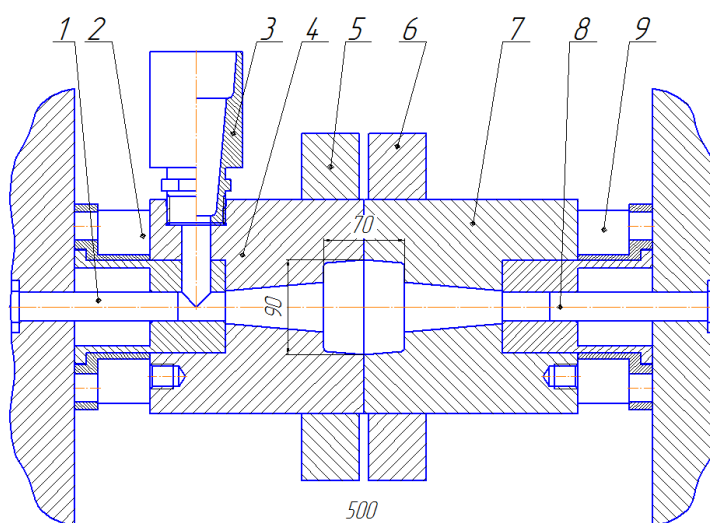


Рисунок 19б. Чертеж технологической оснастки для производства заготовок поршей ДВС

Обозначения: 1 – прессующий плунжер левый; 2 – упор левый; 3 – заливочная чаша; 4 – полуформа левая; 5 – бандаж левый; 6 – бандаж правый; 7 – полуформа правая; 8 – прессующий плунжер правый гайка; 9 – упор правый.

Процесс осуществляется следующим образом: перед началом цикла прессующий плунжер 1 установлен слева от вертикального отверстия заливочной чаши 3. На рабочую поверхность полости формы в раскрытом

состоянии после прогрева до температуры 250 ± 10 °С с помощью pulverизатора наносят слой графитсодержащей краски. Движением плиты левую матрицу 4 приводят в контакт с правой матрицей 7.

Расплав перегревается до 850 °С, счищается шлак, после чего наводится новый слой флюса. Рафинирующая термо-временная обработка расплава проводится в течение 15 мин. Перед заливкой металла полость формы вакуумируется. Расплавленный металл заданного химического состава, мерной дозой с погрешностью $\pm 2\%$ через заливочную чашу заливают в форму в течение 3...5 с. При движении левого плунжера 1 заливочное отверстие перекрывается, а в полость формы запрессовывается объем металла, обеспечивающий, подъем уровня металла до верхней точки формы, после чего, свое движение начинает правый плунжер 8. Время движения плунжеров составляет 33-40 с.

Движение плунжеров навстречу друг другу обеспечивает компенсацию объемной усадки металла, в процессе чего происходит запрессовка внутрь отливки некоторого объема жидкого металла $V_{кр}$. Это становится возможным за счет наложения высокого давления на металл до начала кристаллизации. Давление распространяется во все точки пространства заготовки, обеспечивая эффективную подпитку кристаллизующегося металла. На этом этапе движения плунжеров давление, накладываемое на жидкий металл в камере опрессовки, составляет 500 МПа. Этот уровень давления обеспечивает такое уплотнение металла за счет сближения атомов, которое может быть достигнуто в процессе пластического деформирования в твердом состоянии. В полученной заготовке при этом гарантируется отсутствие литейных дефектов газо-усадочного происхождения, а плотность металла, его структура и физико-механические свойства не уступают свойствам деформируемого сплава того же состава [99].

Таким образом, процесс изготовления заготовки поршня ДВС протекает в следующей последовательности:

- заливка мерной порции металла;

- включение левого прессующего плунжера 1, движение до перекрытия заливочного отверстия в течение 0,2...0,3 с;
- включение правого прессующего плунжера 2;
- повышение давления, развиваемое прессующими плунжерами, до уровня 500 МПа;
- выдержка под давлением в течение времени 30-40 с, для завершения кристаллизации и охлаждение до 400 °С.
- раскрытие формы при движении плиты влево с извлечением отливки из правой части полости формы;
- отвод прессующих плунжеров в исходное положение.

Стоит отметить, что существующие процессы изготовления поршней ДВС [37, 38] требует неоправданно больших финансовых затрат.

В табл. 10 представлен сравнительный анализ производительности базовых процессов изготовления поршней ДВС и предлагаемого.

Таблица 10. Сравнительный анализ производительности изготовления поршней ДВС.

Аналог 1 Получение заготовок из быстрозакристаллизованных заэвтектических силуминов	Аналог 2 Получение заготовки из слитка	Предлагаемый процесс литья с кристаллизацией под давлением
Сравнительный анализ подготовительных операций		
Плавка мастер-сплава в электрической печи-миксере и литье гранул сплава из перегретого расплава с последующей кристаллизацией	Получение литой заготовки методом литья в металлическую форму	Получение заготовки методом литья с ПКНД на кристаллизующийся металл
Вакуумная дегазация гранул в герметичных капсулах	Литую заготовку протягивают свободной ковкой с коэффициентом вытяжки не менее 30% в размер, когда длина по меньшей мере в два раза превышает диаметр	

Горячее компактирование гранул в условиях вакуума и обточка компактных заготовок	Формируют в двойной усеченный конус с углом конусности не менее 10%	
Горячее прессование прутка соответствующего диаметра на гидравлическом горизонтальном прессе	Осаживают в формовочном штампе и обратным прессованием со степенью деформации не менее 40% формируют текстуру металла	
Сравнительный анализ финишных операций		
Изотермическая штамповка	Заготовительная штамповка	Изотермическая штамповка
Механическая обработка	предварительная штамповка	Механическая обработка
Термическая обработка	Окончательная штамповка	Термическая обработка
	Механическая обработка	
Итого. Производительность		
9,8 шт/час	20,4 шт/час	30, 6 шт/час

Задачей исследования при этом является получение достоверных данных и знаний о свойствах и поведении жидкого металла в условиях наложения давления, необходимых для создания и настройки системы автоматизированного управления.

2.3 Разработка аппаратной части автоматизированного комплекса

Необходимо учесть, что под влиянием давления свойства кристаллизующегося металла, в том числе его вязкость будет возрастать. Предполагается, что зависимость объема расплава от температуры формы и металла, а также от величины и скорости наложения давления сложным образом связана с составом сплава, распределением температур, растворенными газами и другими факторами.

В этой связи, указанную зависимость предложено устанавливать с учетом результатов измерений той части общего объема залитого металла, которая под давлением может быть запрессована ($V_{кр}$).

Для этого необходимо с помощью компьютерной информационно-измерительной системы осуществлять запись соответствующих параметров технологического процесса. Результаты измерений должны отражать изменение температуры металла и формы, движение плунжеров, а также изменение давления в гидроцилиндрах пресса.

Предлагается в качестве инструмента для обработки информации с датчиков и управления исполнительными устройствами использовать контроллеры, включающие аналого-цифровые (АЦП) и цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП). Внешний вид используемых контроллеров представлен на рис. 16.

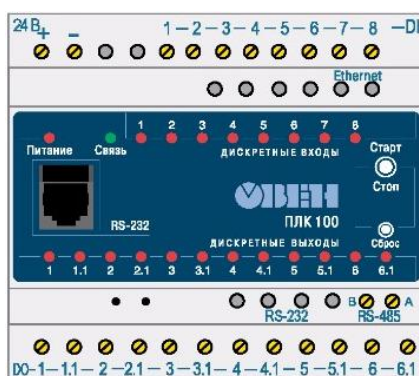


Рисунок 20. Внешний вид используемых контроллеров

Характеристики выбранных контроллеров представлены в табл. 11.

Таблица 11. Характеристики используемых контроллеров

Напряжение питания:	18... 29 В постоянного тока (номинальное напряжение 24 В)
Потребляемая мощность, не более	6 Вт*
Индикация передней панели	1 индикатор питания 8 индикаторов входов 12 индикаторов выходов
Центральный процессор	32-разрядный RISC-процессор 200 МГц на базе ядра ARM9
Объем оперативной памяти	8 Мбайт
Объем энергонезависимой памяти	4 Мбайт**

хранения ядра CoDeSys, программ и архивов	
Размер Retain-памяти	4 кбайт***
Время выполнения цикла ПЛК	Минимальное 250 мкс (нефиксированное), типовое от 1 мс
Количество дискретных входов	8
Электрическая прочность изоляции дискретных входов	1,5 кВ
Максимальная частота сигнала, подаваемого на дискретный вход: - при программной обработке - при применении аппаратного счетчика - при применении обработчика энкодера	1 кГц 10 кГц 1 кГц
Количество дискретных выходов	6 сдвоенных транзисторных ключей (всего 12 выходных сигналов)
Гальваническая развязка дискретных выходов Электрическая прочность изоляции дискретных выходов	есть, индивидуальная 1,5 кВ
Интерфейсы	Ethernet 100 Base-T RS-232 - 2 канала RS-485 USB 2.0-Device
Среда программирования	CODESYS 2.3.8.1 (и старше)
Интерфейс для программирования и отладки	RS-232 USB-Device Ethernet

Основные характеристики АЦП и ЦАП представлены в табл. 12.

Таблица 12. Основные характеристики преобразователей

Характеристики АЦП	
Разрядность, бит	10
Число каналов	1
Тип выхода	I
Время установ., мкс	5
Напряж. питания, В	5: 15
Мощность потр., мВт	30
Интерфейс	парал.
Характеристики ЦАП	
Разрядность, бит	12
Число каналов	1
Внутренний УВХ	-

Время преобр., мкс	6
Напряж. питания, В	+/- 5: 15
Мощность потр., мВт	40
Интерфейс	парал.
Примечание	Требуется внешний ОУ

Все контрольно-измерительные приборы встроены в оборудование и в металлическую форму для контроля основных параметров процесса. Перечень основных преобразователей приведен ниже.

1. Датчики температуры, позволяющие фиксировать температуру отливки и температуру формы.

В качестве первичного преобразователя используются термопары типа R (платинородий-платина) с диаметром электродов 0,5 мм. Термопары установлены в стенку формы и в ее полость. Характеристики термопары с комментариями приведены в табл.13.

Таблица 13. Характеристики используемых термопар

Параметры	Возможные значения	Описание
Тип термопар	Напряжение Резистор КХС Тип (R, S, B, J, T, E, K, N Al, A2, A3, L, M)	Значение «Напряжение» устанавливается при измерении напряжения; «Резистор» - при измерении сопротивления; «КХС» - при измерении температуры холодного спая. Остальные значения устанавливаются в зависимости от используемого типа ПП.
Частота, Гц	1, 4	Частота дискретизации.
Точность измерений	± 3 °C	Определяется техническими характеристиками подключенного ПП
Минимальное значение измеряемой температуры	0 °C	Определяется техническими характеристиками подключенного ПП
Максимальное значение измеряемой температуры	1600 °C	Определяется техническими характеристиками подключенного ПП

Единица измерений	Ом мВ °C	Определяется в зависимости от выбранного типа термопар (для значения «Напряжение» - мВ; «Резистор» - Ом, для остальных значений - °C)
-------------------	----------	---

Для регистрации показаний термопар используется специальная система модулей (рис. 21), включающая в себя измерительные модули, преобразователь интерфейсов, а также программное обеспечение для регистрации полученных значений температуры на ЭВМ.



Рисунок 21. Система специальных модулей

Данная система модулей позволяет визуализировать полученные от термопар данные и на их основе строить графики распределения температуры в режиме реального времени (рис. 22).

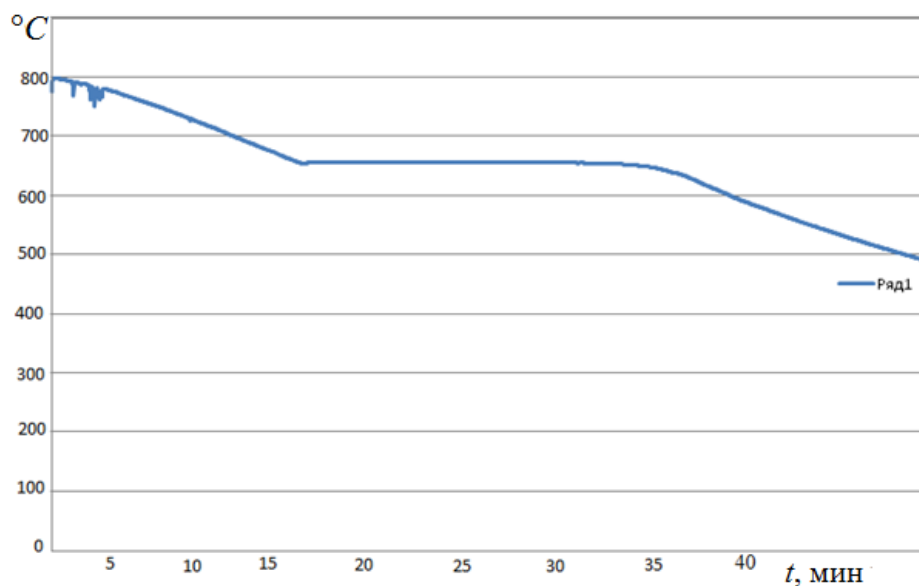


Рисунок 22. График показаний термопары

На рис. 22 показана кривая охлаждения чистого алюминия в графитовом тигле. График показывает, что температура начала кристаллизации равна 660°C , что соответствует температуре начала кристаллизации из справочных материалов [100].

Используемая система модулей позволяет достаточно точно производить измерения температуры с погрешностью $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

2. Датчики давления, установленные в гидроцилиндрах и на основных магистралях гидросистемы пресса.

В качестве датчиков давления используются манометрические выключатели со встроенным цифровым индикатором (рис. 23), с двумя точками переключения и выходным сигналом $4\ldots 20$ мА. Используемые датчики обладают точностью $\pm 1\%$ МЗШ, 3-х разрядным цифровым индикатором, диапазоном измерений от 0 до 200 МПа. Для оптимальной адаптации к условиям измерения в гидравлической системе пресса датчик имеет дополнительные настраиваемые параметры: время задержки при переключении, размыкающая и замыкающая функция выходов.



Рисунок 23. Датчик давления рабочей жидкости в гидроцилиндре

3. Датчики перемещения, предназначенные для измерения перемещения прессующих плунжеров и подвижных узлов пресса.

Для измерения перемещения основных узлов пресса (прессующие плунжеры, плита, шток мультипликатора) используется индуктивный датчик перемещения, представляющий собой дифференциальный индуктивный преобразователь (ДИП). Данный датчик был спроектирован и изготовлен специально для данного пресса.

В ходе разработки данного датчика были решены следующие задачи:

- разработана схема электрическая принципиальная индуктивных датчиков перемещения с отображением расположения выводов датчиков (рис.24);
- разработана конструкция печатной платы индуктивного датчика перемещения (рис. 25);
- отлажены и испытаны образцы индуктивных датчиков (рис. 26).

Данные для подключения датчиков измерения:

- 1) Подключение к питанию +24 Вольта. Разъем X1
- 2) Подключение к входу АЦП. Разъем X2
- 3) Подключение катушки индуктивностей измерителя. Разъем X3

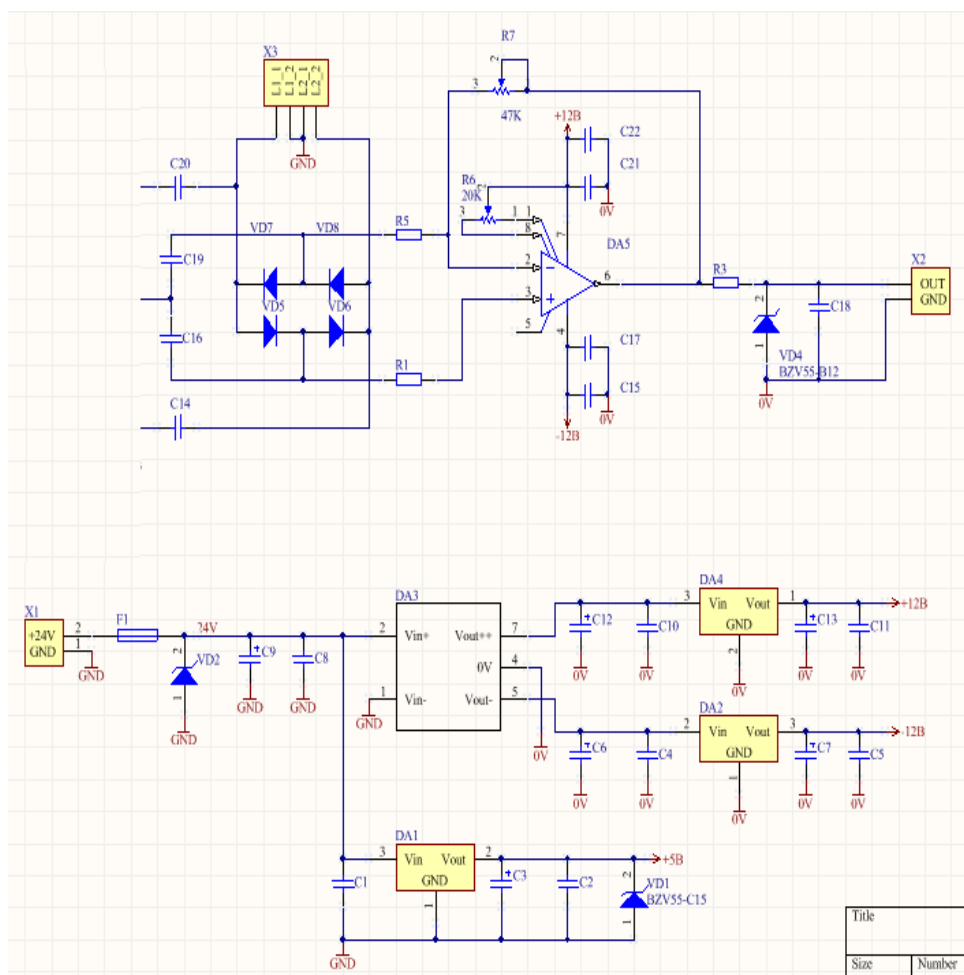


Рисунок 24. Схема электрическая принципиальная

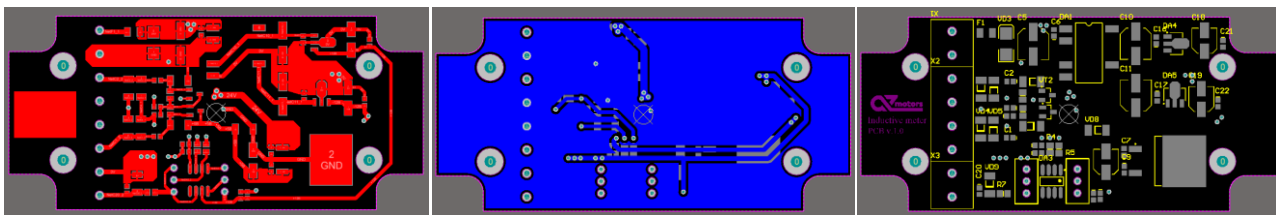


Рисунок 25. Расположение элементов на печатной плате

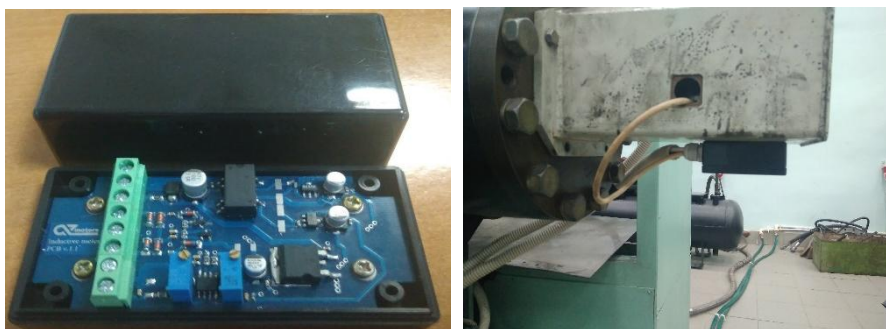


Рисунок 26. Внешний вид датчика

4. Внешний вид используемого программного обеспечения для фиксации основных параметров процесса представлено на рис. 27.

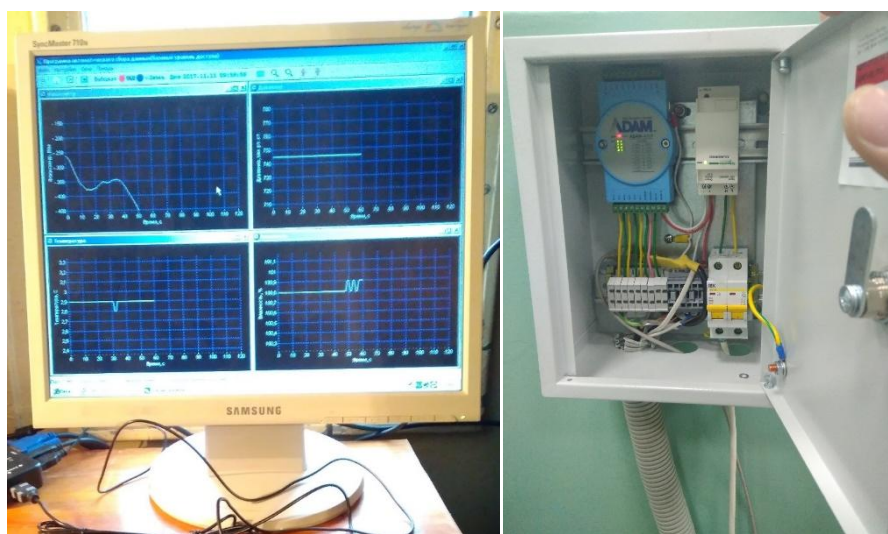


Рисунок 27. Внешний вид программного обеспечения ASAD 2.0

Информация с датчиков записывается в виде графиков. Записываемые кривые 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 (рис. 28).

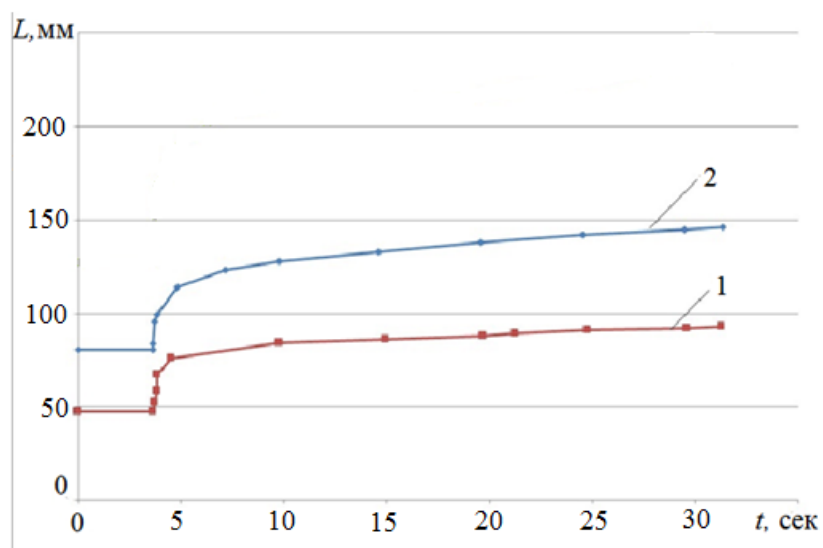


Рисунок 28. Запись перемещения прессующих плунжеров

Обозначения: 1 – плунжер 1; 2 – плунжер 2

Обработка полученной информации позволяет сделать следующие выводы.

В первые секунды плунжер 1 быстро, а затем медленно, преодолевая сопротивление, движется внутрь отливки, после чего останавливается, так как соответствующий поршень гидроцилиндра доходит до упора. Ход прессующего плунжера 1 составляет 125 мм.

Плунжер 2, в первые секунды быстро, а затем по экспоненте во времени, примерно, 32 с опрессовывает жидкий металл, его ход составляет 150 мм.

В свою очередь, суммарное перемещение плунжеров (1,2) дает возможность рассчитать объем запрессованного металла внутрь отливки ($V_{кр}$). Располагая такой информацией можно определить относительную сжимаемость, которая будет равна:

$$\varepsilon = \frac{V_{кр}}{V_0} * 100\%, \quad (6)$$

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

Справочная информация, информация о технологическом процессе, формула (6) и графики 1, 2 (рис. 28) позволяют составить следующие дифференциальные уравнения:

$$\frac{dt}{d\tau} = \left(\frac{\delta^2 t}{\delta x^2} + \dots \right) + S V_{кр} \cdot \rho \quad (7)$$

$$\frac{dp}{d\tau} = \frac{S}{V_0} \frac{dV}{d\tau}, d_p = \varepsilon S \quad (8)$$

$$M \frac{d^2 x}{d\tau^2} = F \Delta p - \lambda \frac{dx}{d\tau} - R \quad (9)$$

$$\frac{dp}{d\tau} = \frac{S}{V} \left(K_y \Delta y l - F \frac{dz}{d\tau} \right) \quad (10)$$

$$Q = \mu y l \sqrt{2(p_h - p_l)} \quad (11)$$

Уравнение (7) при условии описания граничных и начальных условий по экспериментальным данным может быть использовано для определения скорости кристаллизации $V_{кр}$. Уравнение (8) по измеренному относительному изменению объема жидкого металла под давлением используется для расчета модуля упругости жидкого металла ε .

Уравнения (9) – (11) дают представления о работе гидросистемы в динамических режимах.

В системе уравнений (9) – (11) использованы следующие обозначения: t – температура; τ – время; x, y, z – координаты в объеме кристаллизующегося металла; S – скрытая теплота кристаллизации; ρ – плотность металла; M – масса подвижных частей гидроцилиндра; r – перемещение плунжера; F – площадь поршня; λ – коэффициент трения в гидроприводе; R – сила, действующая на жидкий металл; p – давление; V – объем жидкого металла; K_y – коэффициент усилия регулятора давления; μ – коэффициент расхода регулятора; l – перемещение регулирующего органа; p_h – давление на входе в регулятор; p_h – давление на поршень гидроцилиндра; p_l – противодействие в гидросистеме.

2.4 Выводы

1. В соответствии с задачами исследования подобрано оборудование, входящее в состав системы автоматизированного управления, которое

включает в себя два ПЛК, датчики линейного перемещения, датчики температуры и давления.

2. Разработана контрольно-измерительная система для регистрации основных технологических параметров процесса литья с кристаллизацией под давлением.

3. 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.

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

3.1 Математическая модель исследуемого технологического процесса

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 процессе исследований была разработана математическая модель работы гидросистемы пресса, имеющая некоторые сходства с моделью Петрова Н.В., но нужно отметить, что в модели предложенной Петровым Н.В. не учитываются некоторые параметры работы гидравлического насоса, что ведет к увеличению количества допущений [101], а именно:

- сжимаемость жидкости;
- неравномерная подача жидкости насосом;
- расход жидкости через регулятор.

Наличие модели гидравлического насоса позволяет исследовать изменения давления гидравлического насоса с учетом возмущающих воздействий в гидроцилиндрах при различных технологических режимах работы пресса, тем самым рассчитывать нагрузки на органы регулирования, оптимизировать САУ гидравлическим прессом, обеспечить поддержку на заданном уровне параметров, осуществлять управление процессом по заданной траектории в пространстве состояний.

Предлагаемая математическая модель позволяет провести необходимые исследования гидравлического насоса с учетом возмущающих факторов и их производных.

В общем виде давление зависит от совокупности факторов и представлено уравнением следующего вида (12):

$$p(t)=f(\gamma, \omega, \alpha_0, \beta, E, W_0), \quad (12)$$

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.

Поршневая скорость рассчитывается дифференцированием координаты поршня:

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (13)$$

Исходя из схемы насоса (рис. 29), задаем координату поршня:

$$x = -R \times \operatorname{tg} \gamma \times \cos \alpha - R \times \operatorname{tg} \beta \times \sin \alpha \quad (14)$$

Уравнение скорости поршня будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{dx}{dt} = R_{\text{вал}} \cdot \sin \theta \cdot \operatorname{tg} \omega - R_{\text{вал}} \cdot \cos \theta \cdot \frac{1}{\cos^w \gamma} - R_{\text{вал}} \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \cos \theta \cdot \omega, \quad (15)$$

где $R_{\text{вал}}$ – радиус вала

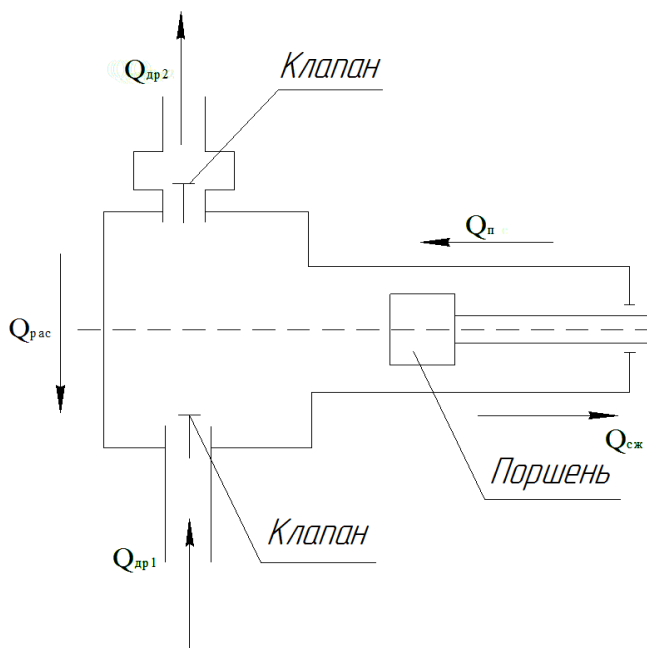


Рисунок 29. Схема действия сил в поршневом насосе

На основе полученной схемы (рис. 29) составляется уравнение неразрывности потока:

$$Q_n + Q_{\partial p1} + Q_{\partial p2} - Q_{pac} - Q_{сж} = 0 \text{ л/мин} \quad (16)$$

Расход потока поршня имеет следующий вид:

$$Q_{\Pi} = \frac{\pi d_{\Pi}^2}{4} \cdot \frac{dx}{dt}, \quad (17)$$

где d_{Π} – диаметр поршня.

Дросселирующие потоки в гидроцилиндрах:

$$Q_{\partial p.1} = \mu_{\partial p.1} \cdot S_{\partial p.1}(a) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_1 - p| \cdot \text{sign}(p_1 - p)} \quad (18)$$

$$Q_{\partial p.2} = \mu_{\partial p.2} \cdot S_{\partial p.2}(a) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_2 - p| \cdot \text{sign}(p_2 - p)} \quad (19)$$

Но основе проделанных вычислений получаем уравнение, которое показывает расход потоков рабочей жидкости в единицу времени на выходе из гидронасоса:

$$\frac{dQ_{abc}}{dt} = Q_n - \left(\frac{\pi d_n^2}{4} \cdot \frac{dx}{dt} + \mu_{\partial p} \cdot S_{\partial p}(\theta) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_n|} \cdot p_n - k_{ym} \cdot p_n \right) \quad (20)$$

где $Q_{abc} = Q_n + Q_{\partial p1} + Q_{\partial p2} + Q_{pac} + Q_{сж}$

μ – угол поворота дросселя

S – площадь дроссельной щели

k_{ym} – коэффициент утечек

Моделирование гидронасоса позволяет изучить режимные параметры давления в камере поршня при заданных режимах работы насоса, также позволяет оценить нагрузки на органе регулирования, провести оптимизацию конструкции насоса и механизмов управления.

Анализируя работу гидравлического пресса, получаем следующую систему дифференциальных уравнений (21).

Решение системы уравнений (21) и исследование влияния потоков рабочей жидкости на динамические процессы гидронасоса необходимо выполнять численным интегрированием на ПК.

$$\left\{ \begin{array}{l} M_1 \frac{dv_1}{dt} = p_1 F_1 - p_2 F_2 - P_y; \\ M_2 \frac{dv_2}{dt} = p_2 F_2 - p_1 F_1 - x_2 C_2 + P_y; \\ \frac{dp_1}{dt} = \alpha_1 \left(\frac{dQ_{abc}}{dt} - F_1 \frac{dx_1}{dt} + F_1 \frac{dx_2}{dt} \right); \\ \frac{dp_2}{dt} = \alpha_2 \left(F_2 \frac{dx_1}{dt} - F_2 \frac{dx_2}{dt} - q_2 \right); \\ \frac{dx_1}{dt} = v_1; \\ \frac{dx_2}{dt} = v_2; \\ \frac{dQ_{abc}}{dt} = Q_n - \left(\frac{\pi d_n^2}{4} * \frac{dx_3}{dt} + \mu_{op} * S_{op}(\theta) * \sqrt{\frac{2}{\rho}} |p_n| * p_n - k_{ym} * p_n \right); \\ \frac{dx_3}{dt} = R_{вал} * \sin\theta * tg\omega - R_{вал} * \cos\theta * \frac{1}{\cos^2\gamma} - R_{вал} * tg\beta * \cos\theta * \omega \end{array} \right. \quad (21)$$

где M_1 – масса пресс-поршня и штока;

M_2 – масса плиты с закрепленной оснасткой;

x_1, v_1, t_1 – перемещение и скорость движения прессующего плунжера;

x_2, v_2 – скорость и перемещение подвижной плиты пресса;

c_2 – коэффициент жесткости притяжных болтов;

P_y – коэффициент сопротивления обрабатываемого сплава;

F_1, F_2 – площадь поршня;

Q_n – подача поршня;

p_1, p_2 – давление рабочей жидкости в полостях цилиндра;

Q_{abc} – расход насоса;

α_1, α_2 – коэффициент жесткости магистралей пресса (напорная и сливная);

q_2 – расход рабочей жидкости через регулятор давления;

γ – угол наклона заслонки;

ω – угловая скорость вала;

$Q_{рас}$ – расход в камере поршня;

θ – угол разворота распределителя;

β – угол в плоскости;

d_n – диаметр плунжера;

$S_{др}(\theta)$ – площадь окна дросселирования.

Математическая модель (21) позволяет:

1 – исследовать параметры пресса и их влияние на динамические процессы в гидронасосе;

2 – рассматривать гидравлический пресс как систему, в которой осуществляется движение исполнительных органов в зависимости от поведения кристаллизующегося металла под давлением, что позволяет проектировать систему управления с оптимальными параметрами.

3.2 Влияние давления на сжимаемость алюминиевых сплавов

На практике, до настоящего момента, в таких технологических процессах как литье под давлением, жидкая штамповка, литье с кристаллизацией под давлением возможность сближения атомов не рассматривалось.

Предполагается, что наложение давления некоторого критического уровня позволит расположить атомы во всем объеме отливки и в конечном итоге даст возможность зафиксировать неподвижное, бесструктурное или аморфизированное состояние металла.

Речь идет о наложении давления на уровне 400...500 МПа с компенсацией усадки в пределах 10...12,5 % в течение отрезка времени 5...10 с при опрессовке заготовок из сплава В95 массой 2,8 кг. Потребная мощность гидронасоса при этом составляет 10 ~ кВт. Это соответствует установленной мощности применяемого гидропривода, если принимать во внимание усредненные величины. В переходных же процессах, давление в рабочей полости гидроцилиндра изменяется по сложной зависимости.

Графики, характеризующие относительное изменение объема жидкого металла (сжимаемость) от величины накладываемого давления и зависимость изменения давления во времени представлены на рис. 30 и рис. 31.

Анализ полученных графиков показывает, что в течение первых 2-3 с относительное изменение объема (сжимаемость, ε) составляет $\approx 10\%$. В дальнейшем, примерно через 20 с и более ε достигает 12,5 – 13%. В то же время объемная усадка сплава в условиях обычной кристаллизации

принимается равной 6 – 6,5 %. Обращают на себя внимание три характерных участка: ОА, АВ ВС (рис. 31).

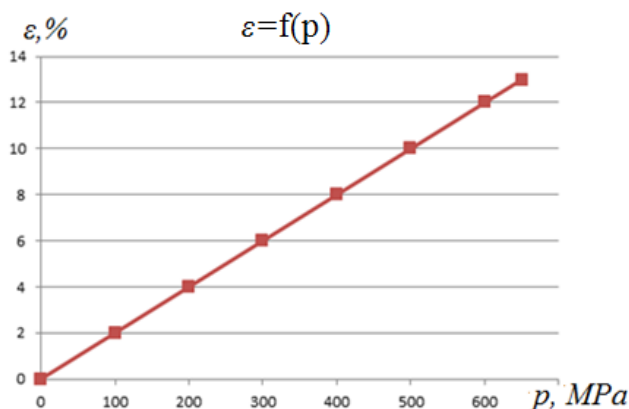


Рисунок 30. Зависимость сжимаемости сплава от величины накладываемого давления

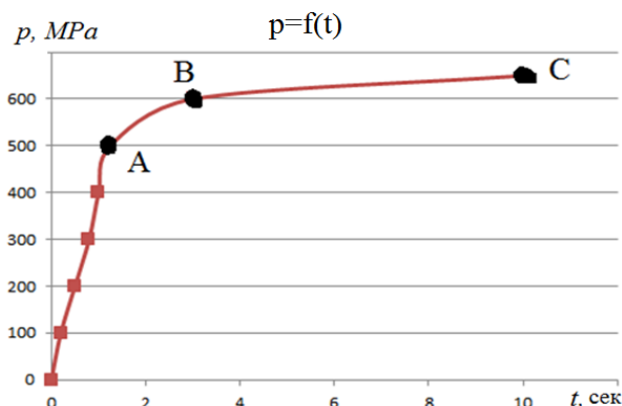


Рисунок 31. Зависимость давления во времени

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

Можно предположить, что на участке ОА происходит относительно быстрое сближение атомов, находящихся в жидком бесструктурном состоянии. Относительно легкое ($P < 100$ МПа) сближение атомов и значительное на 5...7% уменьшение объема в определенной степени может связано со сжатием растворенных в металле газов. Возможно, что амплитуда колебаний атомов при этом настолько велика, что для их сближения больших внешних усилий не требуется. Поэтому применение даже сравнительно небольшого давления может дать значительный эффект повышения плотности металла.

На участке АВ динамика процесса сжимаемости расплава приобретает убывающий характер. Дальнейшее сближение атомов становится невозможным, как невозможно сближение геометрически правильных шаров. Если бы не было отвода теплоты, такое состояние могло бы оставаться неизменным.

В сумме два участка характеризуют поведение жидкого металла под давлением как упругое сжатие пружины, которая после разгрузки восстанавливает форму и размеры.

Вероятно, причина в том, что в процессе последующей выдержки, если не снижать давление, движение плунжеров внутрь полости отливки продолжается, так что сжимаемость на участке ВС может составлять 2...3%. Это означает, что, если по какой-либо причине, давление на металл не воздействует, в нем развиваются усадочные процессы, которые приведут к формированию скрытых, рассредоточенных дефектов в расположении атомов. Напротив, преодолевая сопротивление кристаллизующегося металла, и, запрессовывая дополнительные 2...3% объема, можно создать литой материал, плотность которого сопоставима с плотностью деформированного металла.

Таким образом, коэффициент сжимаемости характеризует изменение объема металла при наложении давления. Установлено (рис. 31), что процесс делится на две фазы:

- 1- опрессовка жидкого металла;
- 2- опрессовка кристаллизующегося металла.

В первой фазе давление на жидкий металл невысокое, после точки перегиба оно нарастает до ~ 400 МПа, и только при этом давлении возможна дальнейшая опрессовка. Время движения плунжеров составляет 20-23 с, суммарное пройденное расстояние прессующих плунжеров 100 мм.

Обращает на себя внимание тот факт, что за первые 2-3 с (точка перегиба А) коэффициент $\varepsilon = 10\%$, что значительно выше объемной усадки; за оставшееся время (за точкой перегиба А) прирост составляет $\varepsilon = 2,3...2,4\%$.

Это объясняется следующим образом: за первые 2-3 с. происходит относительно легкое сближение атомов на расстояние, соизмеримое с амплитудой колебания атомов относительно исходного положения. Дальнейшее уменьшения объема металла связано с переходом атомов из жидкого состояния в твердое, которое сопровождается выделением скрытой

теплоты кристаллизации, когда, преодолевая сопротивление атомов, можно запрессовать дополнительный объем на уплотнение металла, на формирование дополнительных межатомных связей.

В подтверждение вышесказанного предположения можно привести косвенные данные различных авторов [102] о том, что в момент перехода из жидкого состояния в твердое происходит скачкообразное уменьшение объема. То есть в окрестности каждого атома, когда он входит в решетку кристалла остается свободное пространство. Наложением давления сопротивление уже закристаллизовавшихся объемов металла можно преодолевать, создавая тем самым условия для дополнительной «подпитки» жидкости, которая переходит в кристаллическое состояние.

С технологической точки зрения сжатое состояние может быть использовано для предельно возможного уплотнения металла и точного воспроизведения конфигурации и рельефа формы [103].

Уместно отметить, что обработка кристаллизующегося металла давлением во всем объеме до настоящего времени в промышленности не применяется.

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 $\varepsilon(\tau)$ можно представить тремя уравнениями следующего вида (22), где выходом системы является сжимаемость, а на входе давление.

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

$$\begin{cases} p(t) = k_2 * t, & 0 < t < t_1 \\ p(t) = k_3 * t + b, & t_1 < t < t_2 \\ p(t) = k_4 * t, & t_3 < t < t_4 \end{cases} \quad (22)$$

Обозначения: k , k_1 , k_2 – коэффициенты модели, полученные эмпирическим путем; $p(\tau)$ – давление на участках ОА, АВ, ВС; τ – текущее

время; $0 - t_1$, $t_1 - t_2$, $t_2 - t_3$ – интервалы времени, характеризующие участки ОА, АВ, ВС.

Можно высказать предположение, что наложение давления до начала кристаллизации приводит к образованию более плотной структуры, в которой влияние таких дефектов, как растворенные газы, вакансии, дислокации и границы зерен, сведено к минимуму. При этом формирование структуры на уровне межатомных взаимодействий, вероятно, в значительной степени связано с характером изменения давления. В условиях быстрого наложения давления в течение 2-3 с процессы диффузии и перераспределения атомов в соответствии с законами термодинамики пройти не успевают, в то время как на отрезке времени 20-30 с создаются условия для образования равновесных структур.

Из вышесказанного следует, что изменяя скорость наложения давления, а также варьируя температурой расплава, его составом и скоростью охлаждения, можно в широких пределах изменять характер фазовых превращений и структурных изменений. Принципиальное значение при использовании давления приобретает тот факт, что управляя величиной и скоростью наложения давления, формирование структуры и свойств конечной продукции можно проводить на самой ранней стадии технологического процесса – в жидком расплаве до начала и в процессе кристаллизации.

3.3 Моделирование гидронасоса и регулятора давления в составе гидравлической системы

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

В этой связи возникает необходимость в обосновании динамических свойств привода, который используется для наложения давления.

В нашем случае используется гидравлический привод, являющейся наиболее распространенным, проблемы управления в режиме неустановившегося движения связаны с внешними возмущениями. В частности, вследствие непостоянства температуры технологической оснастки изменяется вязкость рабочей жидкости в гидросистеме. Кроме того не представляется возможным рассчитывать на постоянство коэффициента трения.

В теоретическом плане задача динамики решена в отношении подвижных объектов, движение которых описывается дифференциальными уравнениями второго порядка в предположении о постоянстве ньютоновской силы.

Так, динамика привода, гидрокинематическая схема которого приведена на рис. 32, в соответствии с работой [104], может быть представлена следующей системой уравнений гидропривода:

$$\begin{aligned} M\Delta\ddot{x} &= S\Delta p - \lambda\Delta\dot{x} - \Delta R, \\ \Delta\dot{p} &= \frac{E}{V}(2K_y\Delta y - K_p\Delta p - 2S\Delta\dot{x}), \\ \Delta y &= K_\phi\Delta\phi, \\ \Delta\phi &= K_\varphi(\Delta x_3 - K_{o.c1}\Delta x), \\ \Delta\phi &= K_\varphi(\Delta F_3 - K_{o.c2}\Delta F), \end{aligned} \quad (23)$$

где M – масса подвижных частей, кг; $\ddot{x}$ – ускорение поршня м/с²; $\dot{x}$ – скорость поршня, 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_δ – коэффициент усиления ШД; K_9 – передаточные отношения цепей ЭВМ; K_{oc1} – передаточные отношения цепей управления перемещением поршня; K_{oc2} – передаточные отношения цепей управления по силе.

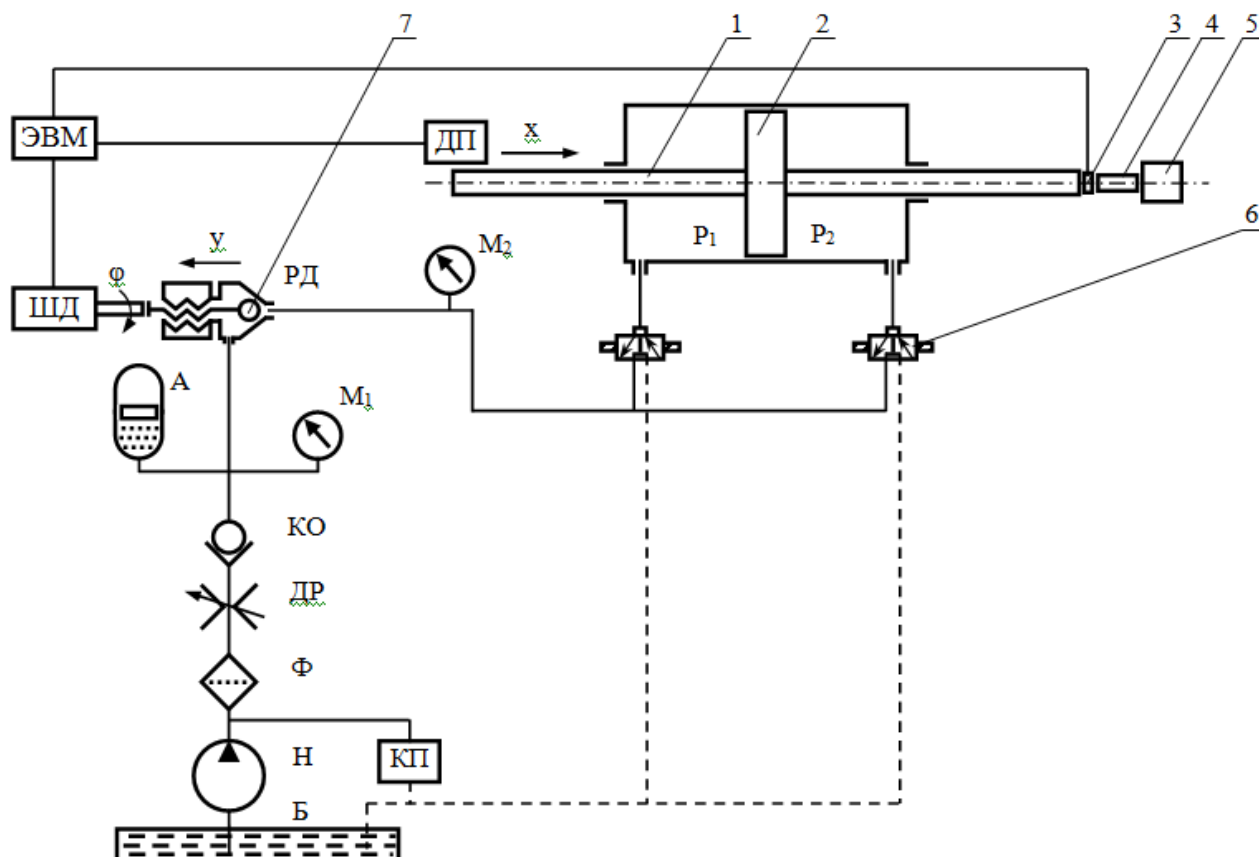


Рис. 32. Гидрокинематическая схема привода

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

Однако в работе [105] показано, что это усилие нарастает по закону, близкому к линейному. Следовательно, оперировать значениями $\ddot{x}$ не

корректно. К тому же в структурной схеме гидропривода, составленной в соответствии с системой уравнений (23), как видно на рис. 33, потери сил на трение представляют собой нелинейное звено.

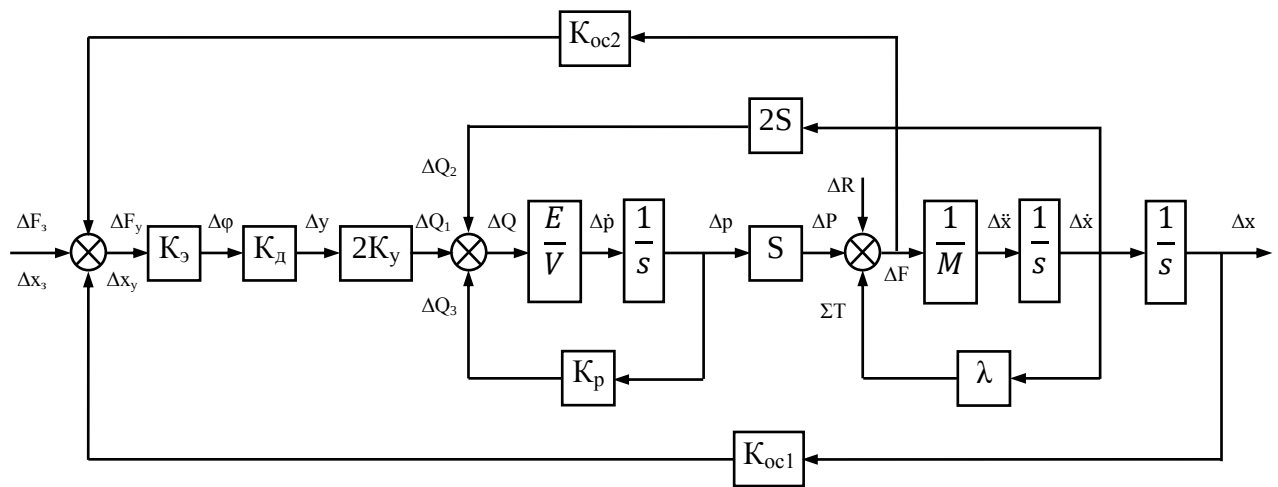


Рисунок 33. Структурная схема гидропривода

Если рассматривается прямая задача динамики, то за основу принимается закон движения поршня, который экспериментальным путем устанавливается по показаниям ДП.

Схема (рис. 33) позволяет наглядно показать взаимосвязь элементов привода с помощью следующих передаточных функций.

В соответствии со схемой на рис. 32 ЭВМ по заранее составленной программе подает сигнал на ШД:

$$W_1(S) = \frac{\Delta\varphi(S)}{\Delta x_y(S)} = K_\Delta.$$

Угол поворота ШД преобразуется в смещение активного элемента 7 (рис. 32)

$$W_2(S) = \frac{\Delta y(S)}{\Delta\varphi(S)} = K_d.$$

Смещение элемента 7 из нейтрального положения приводит к увеличению объема масла, поступающего в полость гидроцилиндра и вытесняемого из нее.

$$W_3(S) = \frac{\Delta Q_1(S)}{\Delta y(S)} = 2K_y.$$

Часть этого объема идет на сжатие масла:

$$W_4(S) = \frac{\Delta p(S)}{\Delta Q(S)} = \frac{E}{V(S)}.$$

Под нагрузкой расход в гидрораспределителе уменьшается:

$$W_5(S) = \frac{\Delta Q_2(S)}{\Delta p(S)} = K_p,$$

а возникший перепад давления, действуя на площадь поршня S , создает силу P , которая затрачивается на преодоление сил инерции движущихся масс:

$$W_6(S) = \frac{\Delta x(S)}{P_I(S)} = \frac{1}{Ms^2};$$

трения в направляющих и уплотнениях штока:

$$W_7(S) = \frac{\sum T(S)}{\Delta x(S)} = \lambda$$

и полезной нагрузки R , которая и создает давление на металл.

Расход масла, затрачиваемый на перемещение (x) штока, характеризуется звеном

$$W_8(S) = \frac{\Delta Q_3(S)}{\Delta x(S)} = 2S,$$

Отрицательная обратная связь между штоком исполнительного цилиндра и ЭВМ – звеном K_{oc1} ; и отрицательная обратная связь между динамометром и ЭВМ – звеном K_{oc2} .

После преобразования структурной схемы по правилам, известным из теории автоматического регулирования, можно вывести уравнения для передаточных функций разомкнутой и замкнутой систем.

Передаточная функция замкнутой системы, охваченной обратной связью:

$$W_3(s) = \frac{x(s)}{\varphi(s)} = \frac{K_d K_3 / K_{oc}}{T^2 s^2 + 2T\xi s^2 + s + K_y} \quad (24)$$

Расчет коэффициента усиления постоянной времени, коэффициента демпфирования:

$$K = \frac{2FK_y K_{oc}}{K_p \lambda + 2F^2}, \quad (25)$$

где $\lambda = 1,5 \cdot 10^4$ кг/с – коэффициент вязкого трения.

Передаточное отношение:

$$K_p = \frac{0,7 \cdot 10^{-8}}{\sqrt{p_n}}; K_y = 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{p_n}; \quad (26)$$

$$\hat{E}\delta = \frac{0,7 \cdot 10^{-8}}{\sqrt{\delta_t}} = \frac{0,7 \cdot 10^{-8}}{\sqrt{10}} = 2,2 \cdot 10^{-9}; K_p = \frac{0,7 \cdot 10^{-8}}{\sqrt{p_n}}; \quad (27)$$

$$\hat{E}\delta = 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{p_i} = 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{10} = 1,6 \cdot 10^{-4}; K_y = 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{p_n}; \quad (28)$$

$$K = \frac{2FK_y K_{oc}}{K_p \lambda + 2F^2} = \frac{2 \cdot 314 \cdot 10^{-4} \cdot 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot 0,65}{2,2 \cdot 10^{-9} \cdot 1,5 \cdot 10^4 + 2 \cdot (314 \cdot 10^{-4})^2} = 3,2 \cdot 10^{-3}; \quad (29)$$

$$T = \sqrt{\frac{MV}{E(K_p \lambda + 2F^2)}}, \quad (30)$$

где объем полости гидроцилиндра:

$$V = \frac{FL}{2} = \frac{314 \cdot 10^{-4} \cdot 440 \cdot 10^{-3}}{2} = 6,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3, M = 30591 \text{ кг}.$$

Модуль упругости рабочей жидкости $E = 1,5 \cdot 10^9$ Па

$$T = \sqrt{\frac{MV}{E(K_p \lambda + 2F^2)}} = \sqrt{\frac{30591 \cdot 6,9 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 10^9 \cdot (2,2 \cdot 10^{-9} \cdot 1,5 \cdot 10^4 + 2 \cdot (314 \cdot 10^{-4})^2)}} = 0,16 \quad (31)$$

$$\xi = \frac{V\lambda + K_p EM}{2\sqrt{EMV(K_p \lambda + 2F^2)}} = \frac{1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 10^4 + 2,2 \cdot 10^{-9} \cdot 1,5 \cdot 10^9 \cdot 30591}{2 \cdot \sqrt{1,5 \cdot 10^9 \cdot 30591 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot (2,2 \cdot 10^{-9} \cdot 1,5 \cdot 10^4 + 2 \cdot (314 \cdot 10^{-4})^2)}} = 4,3. \quad (32)$$

Тогда

$$W_3(s) = \frac{x(s)}{\varphi(s)} = \frac{K_A \cdot K / K_{oc}}{T^2 s^3 + 2T\xi s^2 + s + K} = \frac{0,0049}{0,025 \cdot S^3 + 1,376 \cdot S^2 + S + 0,032} \quad (33)$$

В соответствии с уравнением (33) составлена структурная схема замкнутой системы (рис. 34).

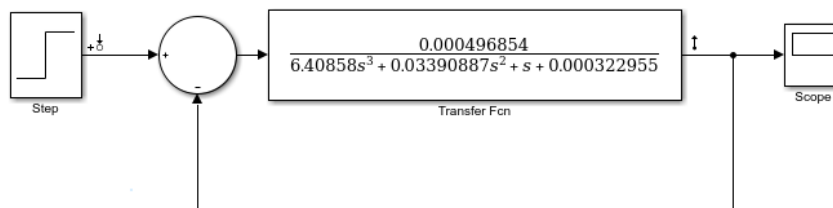


Рисунок 34. Структурная схема замкнутой системы

Использование передаточных функций в процессе моделирования в среде MATLAB на этапе исследования и проектирования системы управления технологическим оборудованием дает возможность оптимизировать конструктивные параметры СУ и обеспечить устойчивость управления в режиме установившегося движения [106].

Для моделирования выбрана среда MATLAB. При таком моделировании предполагается решение системы уравнений состояния широко известными численными методами – в том числе с использованием рекуррентных и итерационных алгоритмов [107].

В ходе выполнения работы был реализован пакет Control System Toolbox (CST) и использованы принципы и методы объектно-ориентированного программирования. Предложен новый подкласс объектов управления: линейные системы с постоянно-заданными параметрами. Такой подкласс включает линейно-непрерывные или дискретные, одномерные с одним или несколькими входами и выходами (SISO-системы), а также многомерные с множеством входов и/или выходов (MIMO-системы) системы. Определенный идентификатор присваивается каждому объекту.

Функции данного пакета осуществляют необходимые методы исследования динамических систем, которые основываются на использовании передаточных функций и моделей для переменных состояний. Нули и полюсы, временные и частотные характеристики вычисляются и отображаются в виде графиков.

Пакет Simulink служит для моделирования выбранных систем и устройств.

Блок-схема моделируемой системы (рис. 35) включает в себя несколько блоков-источников, генерирующих сигналы, которые вызывают «движение» моделируемой системы, и блоки приемников, которые позволяют получить информацию о выходных сигналах системы.

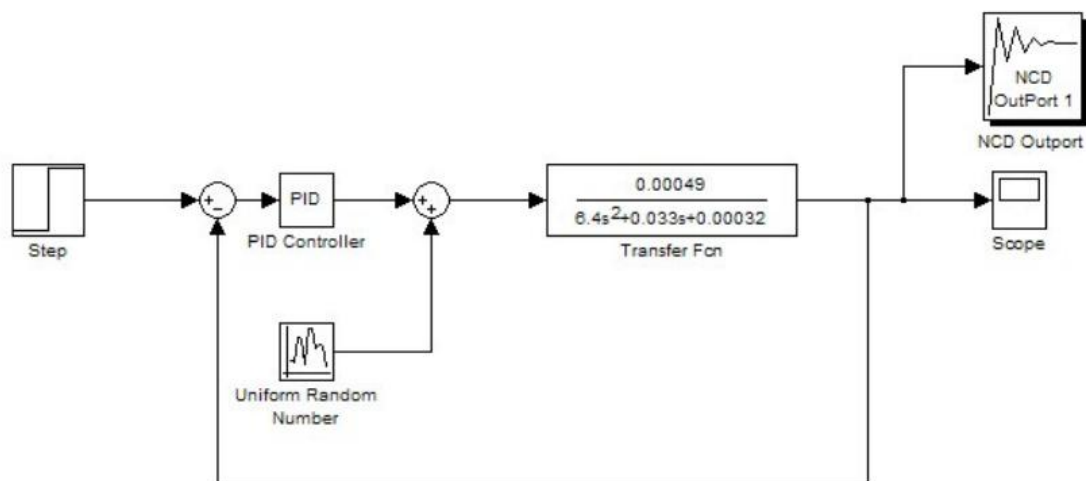


Рисунок 35. Блок схема моделируемой системы

В процессе исследований установлено, что разработанная модель позволяет изучить влияние параметров системы управления прессом на динамические процессы при наложении давления на кристаллизующийся металл; при этом пресс рассматривается как единая система, в которой осуществляется перемещение всех рабочих органов в пространстве, в том числе прессующих плунжеров, что позволяет вносить коррективы во время настройки оптимальных параметров управления процессом.

Модель процесса является сложной. Ее параметры и структура из-за недостаточной априорной информации не известна, кроме того, параметры изменяются во время протекания технологического процесса. Разработанная модель в среде MATLAB с использованием пакета расширения Simulink отображает логику работы гидропрессового оборудования с учетом взаимосвязей узлов преобразователя и измеряемых параметров.

На схеме (рис. 36) представлены основные элементы: модель установки – источника сигналов, информация о параметрах, которые используются для определения частоты вращения гидравлического насоса; модель измерительного преобразователя, состоящая из аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразователей, программируемого микроконтроллера, генератора тактовых импульсов и индикатора. Элементы представлены в виде подсистем.

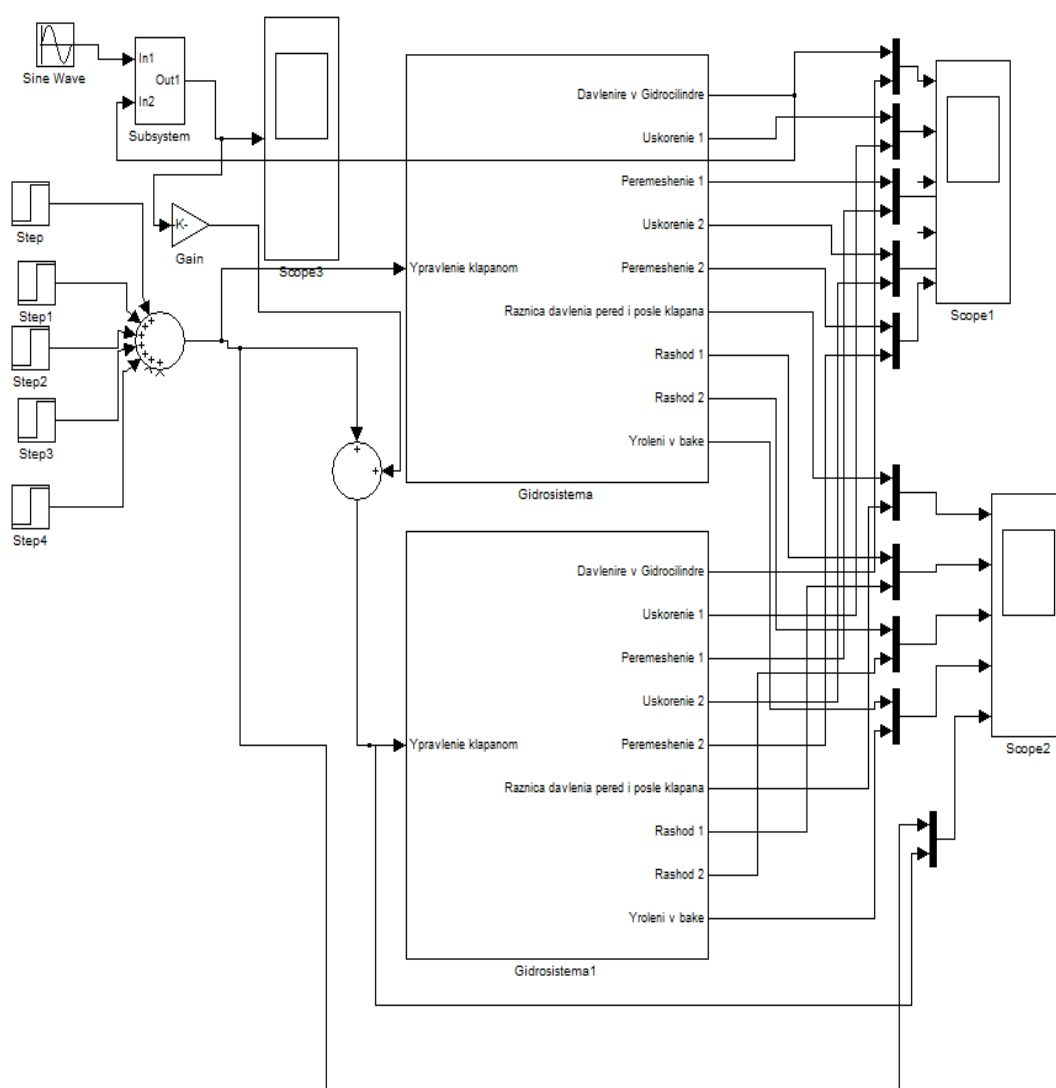


Рисунок 36. Модель гидросистемы пресса для литья с кристаллизацией под давлением

Каждый имитированный датчик состоит из блока источника сигнала постоянной величины — Constant, который складывается с сигналом,

получаемым на выходе генератора случайных колебаний — Random Number, амплитуда и частота изменения которого задается окном настройки параметров определенного блока и приблизительно соответствует диапазону возможных значений параметров конкретной установки.

Результаты моделирования можно просмотреть путем раскрытия блока Score на основной блок-диаграмме.

Построением логарифмических амплитудных и фазово-частотных характеристик (рис. 37) установлено, что качество управления и устойчивость управления доведены до уровня предъявляемых требований.

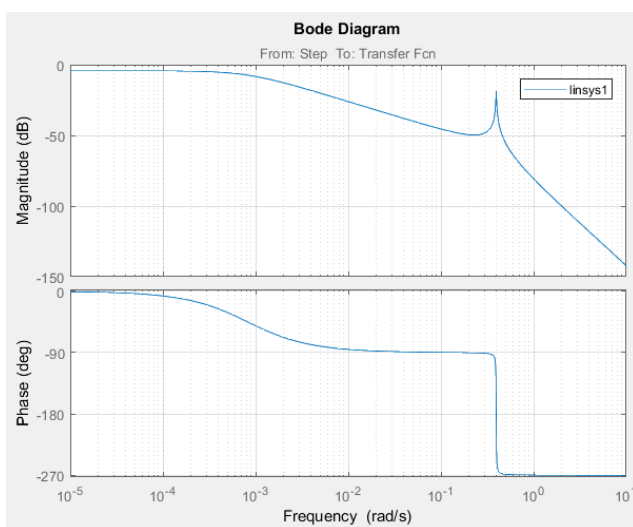


Рисунок 37. ЛАЧХ и ЛФЧХ

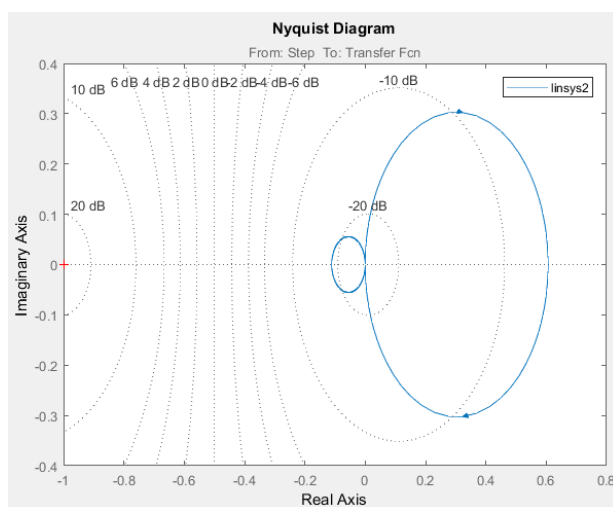


Рисунок 38. Амплитудно-фазовая характеристика

Построен частотный годограф Найквиста (амплитудно-фазовая характеристика) с нанесенной на него координатной сеткой (рис. 38):

Проведен анализ устойчивости системы.

Пример программы исследования поведения звена в зависимости от изменения параметра p представлены на рис. 39, где

$p = 300$ МПа,

$p = 400$ МПа,

$p = 500$ МПа.

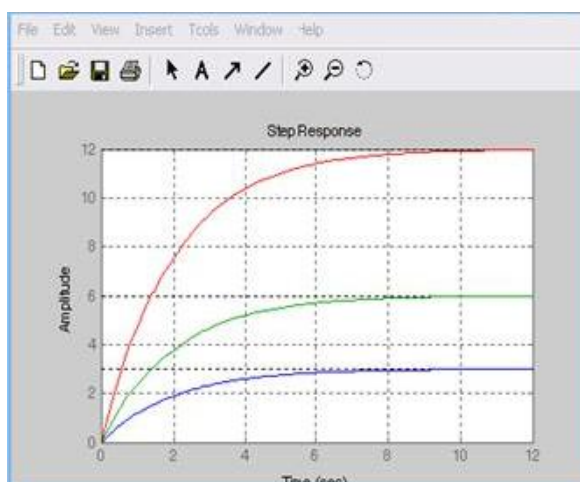


Рисунок 39. Исследования поведения звена в зависимости от изменения давления

График переходного процесса представлен на рис. 40.

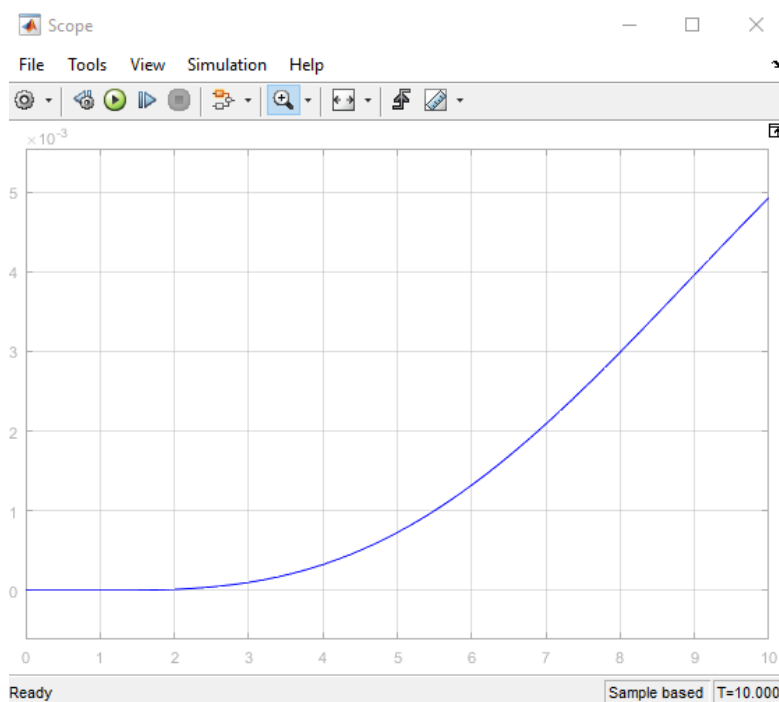


Рисунок 40. График переходного процесса

Также проведен синтез АСР на основе ПИД-Регулятора с использованием программной среды CurveExpert.

При начале работы с программой вводятся координаты точек, согласно требуемому закону изменения давления (рис. 41).

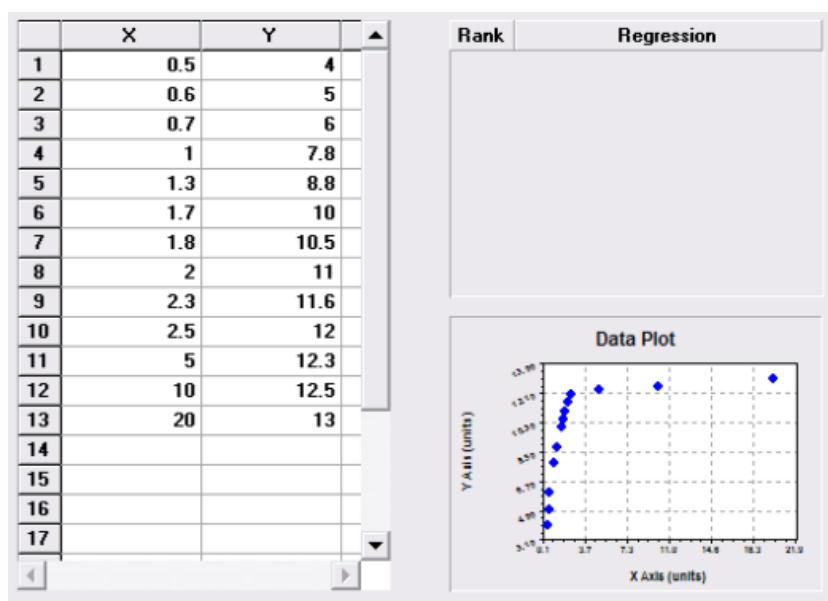
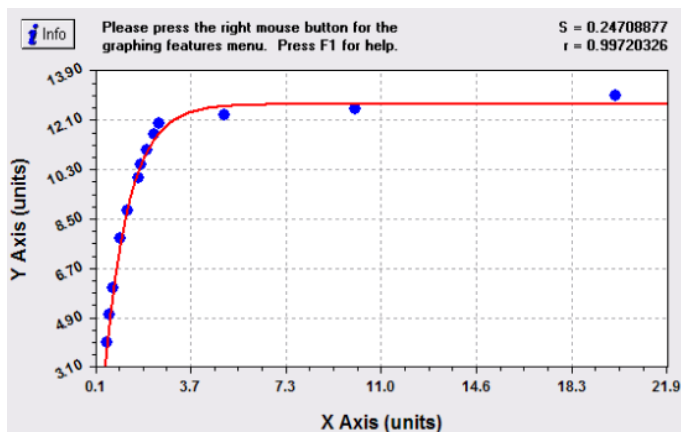
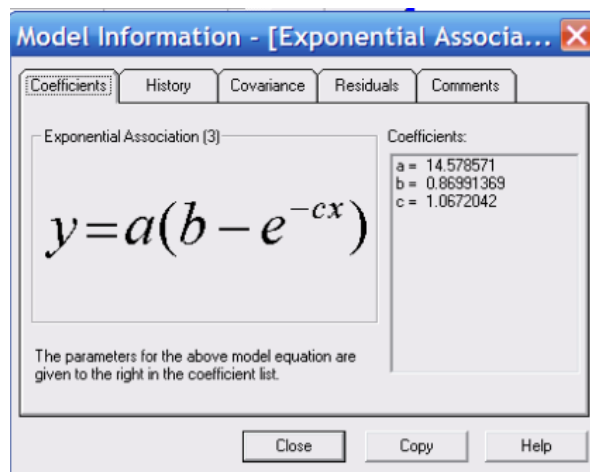


Рисунок 41. Интерфейс программы

После получения результатов вычисления, выбираем функцию, максимально соответствующую введенным данным. Для этого необходимо определить значение «г», которое должно быть максимально близко к единице (рис. 42).

После нажатия кнопки «INFO» определяется нужная функция (рис. 43).

Рисунок 42. Определение функции
входящего сигналаРисунок 43. Определение
коэффициентов функции

В сумме, три компоненты ПИД-регулятора обеспечивают получение эффективного результата в коротком промежутке времени.

После запуска процесса оптимизации в окне NCD_Outport отображаются варианты переходного процесса при изменении настроечных параметров.

Настройка заканчивается, когда процесс попадает в заданные границы, как показано на рис. 44.

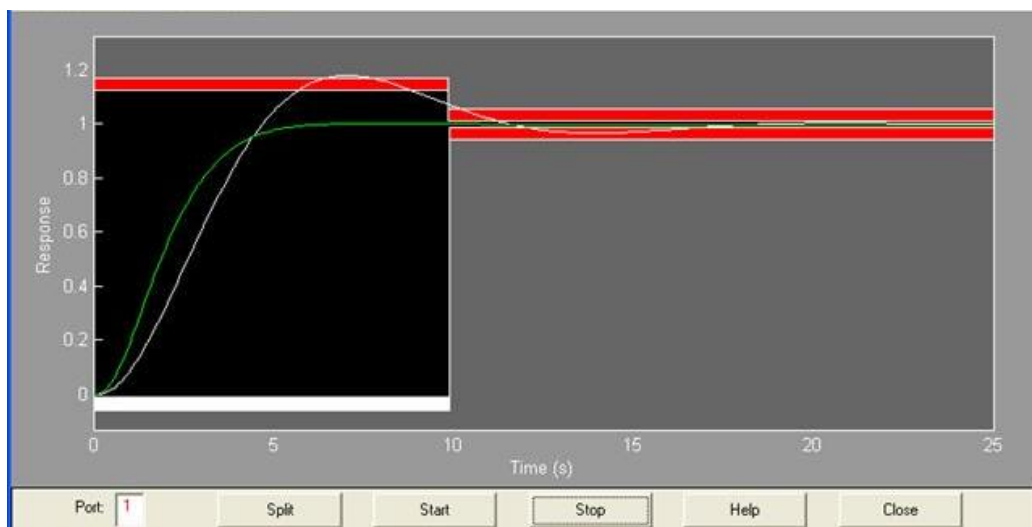


Рисунок 44. Окно NCD_Outport с законченным процессом оптимизации

По окончании процесса оптимизации, оптимальные значения настраиваемых переменных, соответствующие кривой зеленого цвета, сохраняются в рабочем пространстве MATLAB.

Используемый в MATLAB язык программирования, основан на архитектуре потоков данных. В таких языках операторы выполняются не порядком их следования, а наличием данных на входах этих операторов, а операторы, которые не связанные по данным, могут выполняться параллельно и в произвольном порядке [108, 109].

Программное обеспечение позволяет проводить анализ работы технологического оборудования (гидравлического пресса), определять корректирующие коэффициенты.

Таким образом, разработанная модель гидропривода предоставляет возможность изменять функцию величины давления во времени не только в установившемся стационарном режиме, но и в режиме переходного процесса. В данном случае не преследуется цель, минимизировать время выхода на номинальный уровень давления. Необходимо время переходного процесса привести в соответствие со временем охлаждения металла и развитием процесса кристаллизации. Наличие в гидрокинематической схеме регулятора с

управляемым по программе приводом от шагового двигателя обеспечивает контроль за изменением гидравлического сопротивления и настройку системы на отработку требуемого закона наложения давления.

3.4 Выводы

1. Разработана модель, устанавливающая зависимость сжимаемости кристаллизующегося металла от величины накладываемого давления и скорости его наложения.

2. Разработанная модель гидропривода предоставляет возможность изменять величину давления во времени не только в установившемся стационарном режиме, но и в режиме переходного процесса.

3. Анализ устойчивости и качества управления проектируемой системы в интерактивной среде MATLAB показал, что система устойчива и обеспечивает необходимое качество регулирования.

4. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ НАЛОЖЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА ЖИДКИЙ И КРИСТАЛЛИЗУЮЩИЙСЯ МЕТАЛЛ

Металлопродукцию вправе относить к классу сложных объектов со скрытыми свойствами. Ставится задача автоматизации управления процессом формирования металла на самых ранних стадиях технологического процесса. Для решения поставленной задачи необходимо учитывать информацию о влиянии каждого отдельного фактора и о влиянии этих факторов во взаимодействии на объект управления. Это становится возможным за счет контроля параметров, обработки информации и оперативного принятия решений для организации управления процессом [110].

На основе выполненного анализа, требования к системе управления (СУ) можно представить в следующем виде:

- По характеру программной реализации СУ должна быть гибкой с возможностью предварительной или в режиме реального времени настройкой режимных параметров для гарантированного достижения заданных свойств.
- СУ должна включать подсистему информационного обеспечения по таким параметрам процесса, как температура формы и металл, давление в гидросистеме, время выдержки под давлением, скорость наложения давления, перемещение прессующих плунжеров, остаточное давление воздуха в полости формы.
- Алгоритм должен быть составлен в соответствии с функциональной схемой, а объект управления – процесс формирования структуры и свойств металла должен иметь на входе управляющее воздействие $p(\tau)$ (наложение давления).

В отличие от традиционных СУ, где на заданном уровне поддерживаются значения параметров на выходе, предлагаемая СУ должна быть рассчитана на отработку требуемого закона изменения давления, генерируемого СУ. Этот закон должен учитывать сжимаемость расплава, которая напрямую влияет на механические свойства получаемых заготовок.

Необходимо решить следующие основные задачи управления и обработки информации:

- поддержание малой динамической ошибки стабилизации и неизменных динамических характеристик замкнутого контура вне зависимости от меняющихся переменных параметров объекта на входе;
- программное управление технологическим процессом с возможностью его коррекции в режиме реального времени;
- оперативное получение и вывод на экран информации об основных параметрах объекта управления (ОУ);

Выход технологического процесса на заданный режим и его стабилизация. Это основная задача управления процессом в условиях неопределенности, которая обусловлена отсутствием информации о возмущающих воздействиях на входе. Незнание всех значений параметров на входе в систему приводит к ухудшению пропускной способности канала стабилизации, и как следствие снижение устойчивости работы контура стабилизации.

Программное управление технологическим процессом с возможностью его коррекции в режиме реального времени. Решение данной задачи позволит осуществлять управление процессом в режимах: пуска, остановки и управления на программном уровне различными изменениями переменных технологического процесса на той или иной стадии.

Получение и вывод на экран информации об основных параметрах объекта управления включают в себя целый ряд различных задач. В первую очередь, к ним относятся задачи получения и обработки информации, которые зависят от меняющихся характеристик каналов связи. Еще одной задачей из данной группы является программная идентификация режимов и параметров технологического процесса для вывода справочной информации, ее регистрации и функциональной диагностики ТП.

4.1 Разработка функциональной и структурной схем системы управления процессом

Для решения задач управления разработано информационное обеспечение, которое включает:

- обработку информации с контрольно-измерительных приборов с заданной производительностью, точностью и скоростью, а также визуализация обработанной информации;
- анализ работы технологического оборудования на основе результатов информации с контрольно-измерительной системы;
- вывод на панель оператора оптимальных рабочих параметров;
- генерацию оптимальных параметров работы системы;
- генерацию закона наложения давления;
- диагностику технологического оборудования;
- работа в автоматизированном режиме.

В соответствии с требованиями разработана структурная схема АСУ ТП. (рис. 45).

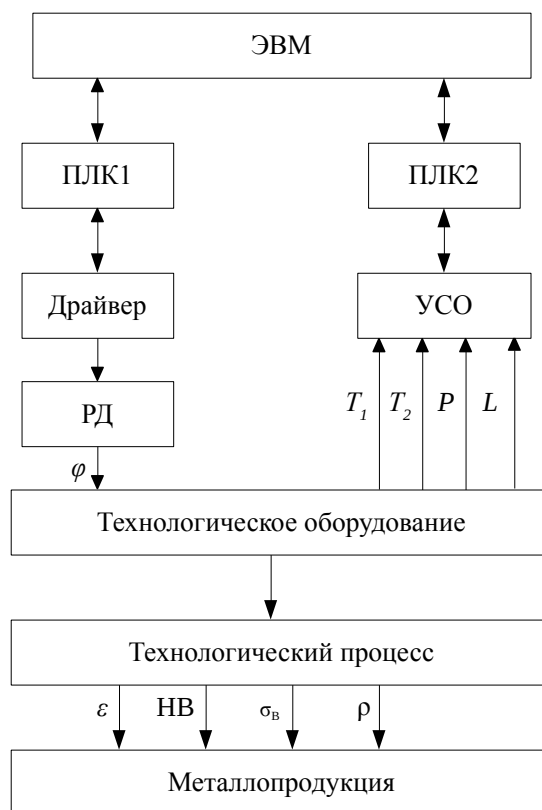


Рисунок 45. Структурная схема АСУ ТП

где ϕ – угол поворота шагового двигателя, T_1 – температура формы, T_2 – температура металл, P – давление в гидросистеме, L – перемещение плунжеров, ε – сжимаемость, НВ – твердость, ρ – плотность металла, σ_B – предел прочности.

Разработанная структурная схема включает в себя возможность отработки заданного закона изменения давления, характеризующегося давлением в гидроцилиндре (рис. 46) при условии, что химический состав обрабатываемого сплава соответствует данным из табл. 14, а необходимыми выходными физико-механическими свойствами получаемых заготовок являются твердость и предел прочности.

Таблица 14. Химический состав обрабатываемого сплава

Основные элементы, %						Примеси, %		
Al	Cu	Mg	Mn	Zn	Cr	Fe	Si	Ni
Основа	1,4-2,0	1,8-2,8	0,2-0,6	5,0-7,0	0,1-0,25	0,5	0,5	0,1

При включении гидропривода переходный процесс в гидросистеме протекает в течение 15 с, причем в моменты времени срабатывания клапанов, через которые рабочая жидкость давит на плунжеры 1 и 2, давление в гидросистеме резко падает. Движение плунжеров происходит под влиянием давления, которое на отрезке времени 3-15 с, изменяется по зависимости близкой к линейной.

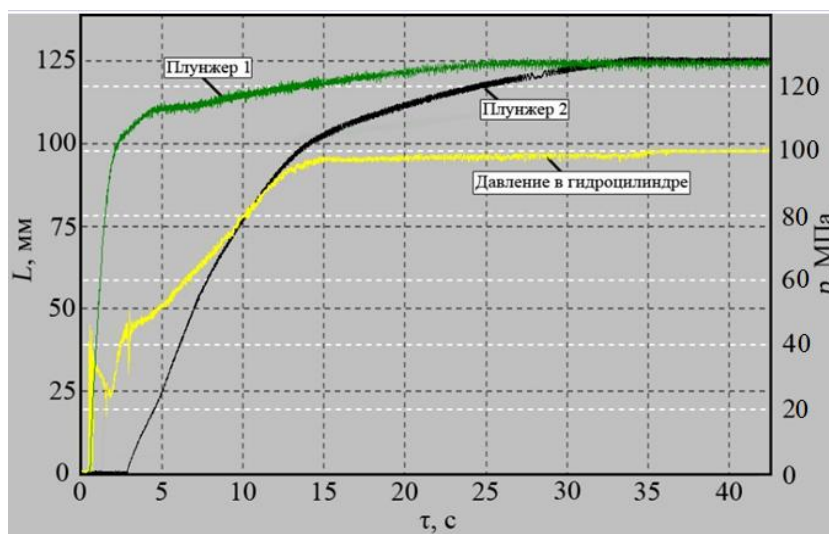


Рисунок 46. Зависимости движения плунжеров и роста давления в системе, где L – перемещение плунжеров; p – давление в гидросистеме.

После анализа структурной схемы спроектирована функциональная схема автоматизации (рис.47), включающая основные элементы и их связи.

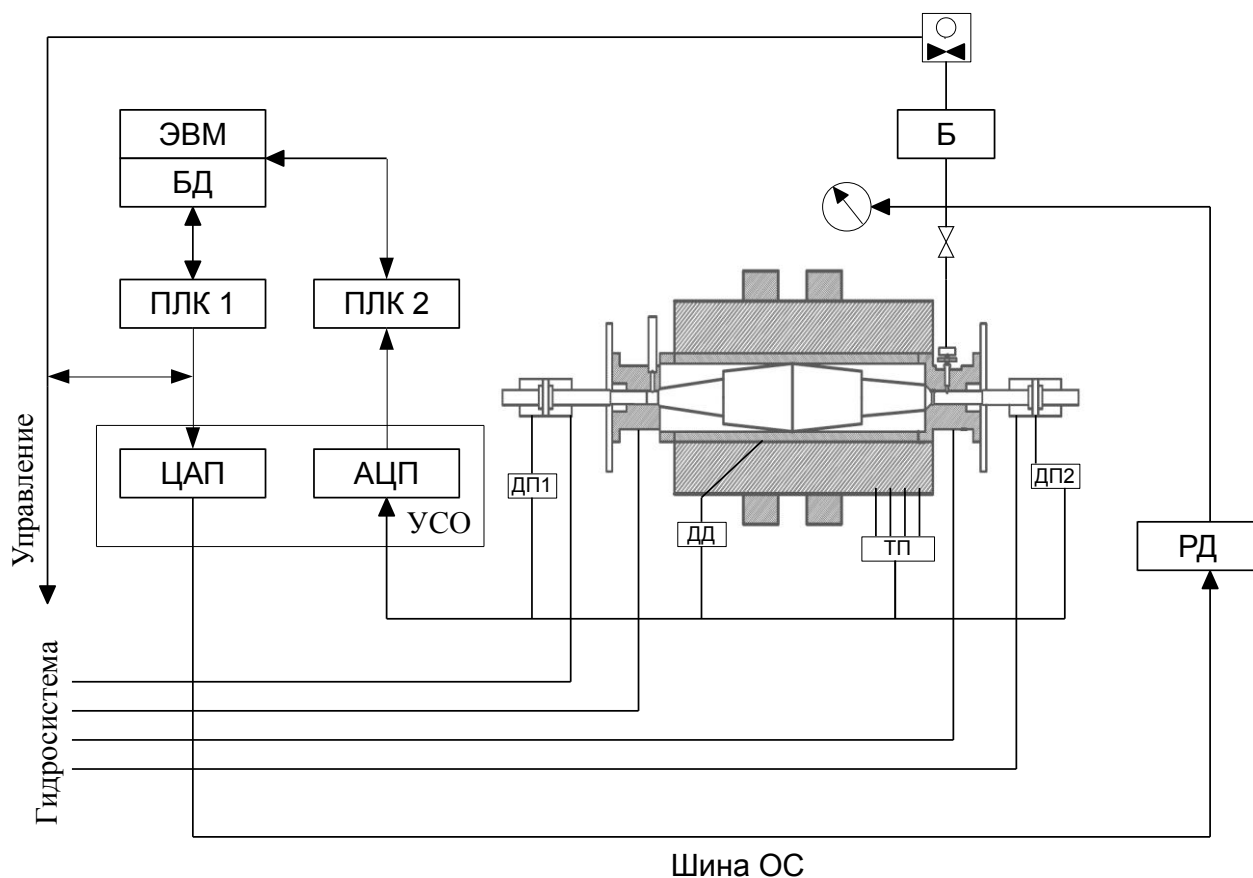


Рисунок 47. Функциональна схема

Обозначения: ДП – датчик положения; ДД – датчик давления; ТП – термодары; РД – регулятор давления; Б – бустер.

Разработанная функциональная схема показывает необходимость анализа всех контролируемых параметров прессы, которые система управления учитывает на программном уровне.

Разработанные структурная и функциональная схемы достаточно точно учитывают выбранные элементы САУ. Далее выбирают программные и инструментальные средства реализации САУ, после чего следует проектирование управляющих и вычислительных алгоритмов, а также их программная реализация. В разрабатываемой системе основная роль отведена программе управления, установленной и функционирующей на ПК, где ПК является пультом оператора, а установленное управляющее программное

обеспечение представляет собой связующее звено, которое позволяет обработать всю необходимую информацию и выработать управляющие воздействия.

Таким образом, необходимо установить зависимость параметров структуры обрабатываемого металла от закона изменения давления или от положения прессующих плунжеров, тем самым обеспечить программно-корректируемое наложение давления. Такая система динамические свойства гидропривода позволит приводить в соответствие с поведением расплавленного металла под давлением.

В предлагаемой СУТП имеется два контроллера ПЛК1 и ПЛК2. Основная часть системы управления ориентирована на ПЛК2. В него заложены функции управления и функции сравнения результатов работы на выходе с параметрами на входе. ПЛК1 предназначен для повышения производительности, функциональности и надежности системы управления. Это становится возможным за счет перераспределения задач. Кроме того, ПЛК1 отвечает за управление шаговым двигателем (ШД), который регулирует зазор в проходном сечении гидросистемы. Еще одной функцией ПЛК1 является формирование отчетов о проделанных технологических операциях и отправки этих отчетов в базу данных. В ПЛК1 также добавлена функция программной коррекции и обратной связи, что позволяет вносить необходимые коррективы в технологический процесс, поддерживать заданный закон управления, проводить запланированную диагностику оборудования и системы управления.

Автоматизация управления формированием свойств металлопродукции осуществляется на основе контроля и стабилизации зависимости относительной сжимаемости расплава от величины накладываемого давления. При этом управление формированием структуры алюминиевых сплавов нацелено на то, чтобы всестороннее давление, накладываемое на жидкий металл, было направлено на формирование заданной неравновесной структуры.

Способ управления процессом кристаллизации алюминиевых сплавов осуществляется следующим образом: на кристаллизующийся металл накладывают давление пресс-плунжерами, движущимися друг навстречу другу, в однофазном режиме и повышают его со скоростью 120-125 МПа/с, с интервалами 0,5-0,1 с, в течение 4 с до величины 500 МПа, тем самым уплотняя металл на 12,8%. Подпрессовка металла осуществляется под давлением $p=3\sigma_t(t)$, где $\sigma_t(t)$ – предел текучести опрессовываемого сплава с учетом температуры, до тех пор, пока металл не охладится до 100-150°C. Нужно отметить, что величина накладываемого давления (500 МПа) и общее время опрессовки (4 с), по 120-125 МПа/с, с интервалами 0,5-0,1 с, для сплава В95 определены экспериментально [111].

Предлагаемый процесс позволяет накладывать давление с фиксированной скоростью до уровня 500 МПа в однофазном режиме. Это становится возможным, как уже отмечалось выше, за счет установки в гидросистему регулятора давления (РД), который управляется шаговым двигателем от АСУ ТП. Схема РД и его основные характеристики приведены на рис. 48 и в табл. 15.

По программе, содержащейся в ЭВМ, считываются показания датчиков. Зафиксированные значения сравниваются с заданными. При наличии отклонений с тем или иным знаком вырабатывается команда на включение ШД (1). При этом за счет смещения винта (2) изменяется расходная характеристика РД, чем и обеспечивается наложение давления по требуемому закону.

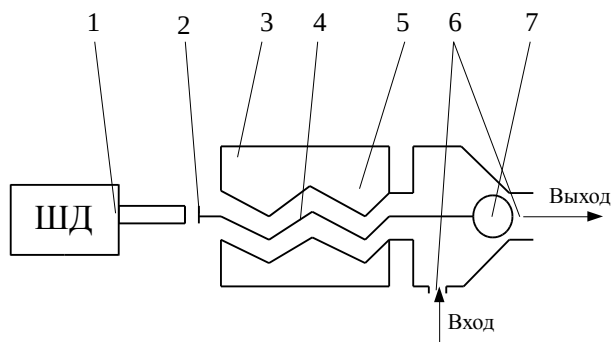


Рисунок 48. Схема регулятора давления

Обозначения: регулятор давления (5); корпус (3), в котором выполнены два канала (6), связанные с входами и выходами гнутыми патрубками из нержавеющей стали; винта (2); привода винта в виде шагового двигателя (1); пружины (4); активного элемента регулятора давления в виде стального шарика (7).

Таблица 15. Характеристики регулятора давления

Технические характеристики								
Условное давление на входе, МПа	Рабочее давление масла на входе регулятора, МПа		Диапазон настройки давления на выходе, ГПа		Точность поддержания давления, %		Условный проход регулятора, мм	
100	50...100		0,1...1,0		5		20	
Быстродействие активного элемента								
ϕ , угол поворота	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
K_v , пропускная способность (м ³ /час)	6	5,3	4,7	4	3,4	2,5	1,8	1
$P_{\text{РВЛХ}}$, МПа	500	440	380	320	260	200	140	70

Параметры настройки ШД выбираются из условия, что скорость наложения давления превышает требуемую по технологии скорость на 20-25%. При включении насоса гидросистема поднимает давление, которое начинает превышать требуемое, это фиксируется датчиком давления. По программе, когда давление достигает 100-125 МПа подается команда на отключение гидропривода, давление в системе начинает падать, при этом, осуществляется сравнение фактического давления с давлением, которое должно быть в данной момент времени по программе. В момент, когда значения выравниваются, происходит включение насоса, и так через каждые 120-125 МПа, до тех пор, пока давление не поднимется до уровня 500 МПа.

Установленное на 20-25% увеличение скорости наложения давления выбрано с учетом чувствительности датчика и времени срабатывания гидравлических клапанов, которое составляет 0,05-0,1 с.

В разрабатываемой системе управления, давление используется как термодинамический фактор, который, как и температура определяет состав фаз в неравновесных условиях и влияет на фазовые превращения и структуру в твердом состоянии при изменении скорости наложения давления. То есть наложение давления является фактором воздействия, определяющего множество вариантов сочетания технологических параметров, приводящих к формированию той или иной структуры сплавов.

Формирование заданного состояния может быть достигнуто в условиях сверхбыстрого сжатия при температуре выше температуры начала кристаллизации, когда атомы утрачивают характерную для них диффузионную подвижность и способность формировать равновесные фазы, отличающиеся по составу и строению кристаллической решетки. Такое состояние может быть достигнуто, если такие параметры процесса, как перегрев жидкого металла над температурой ликвидус, скорость нарастания давления, временные интервалы между импульсами, величина давления, накладываемого на жидкий металл, степень сжатия жидкого металла до начала кристаллизации подобраны предварительно опытным путем и обеспечивают необходимое сближение атомов до начала кристаллизации.

Для создания в процессе заливки жидкого металла в полость пресс-формы вакуума 0,1-0,2 атм предусмотрена автономная вакуумная система, представляющая собой вакуумный насос, вакуумный ресивер и дистанционно управляемый клапан. Вакуумирование позволяет не только увеличить скорость заполнения полости формы жидким металлом, но и создает условия, при которых жидкий металл затекает с заданной скоростью сплошным фронтом без разбрызгивания.

Управление величиной накладываемого давления и перемещением плунжеров, происходит таким образом, чтобы достичь заданного уровня механических свойств изделий.

В связи с этим гидропривод, используемый для наложения давления на жидкий металл, помимо статических (развиваемое усилие, жесткость) и динамических (устойчивость, точность, качество переходного процесса) характеристик должен отвечать таким требованиям как, управление законом развиваемого усилия и скоростью перемещения. К числу параметров, определяющих усилие и скорость перемещения плунжеров, относится давление в рабочей полости цилиндров и полости слива, масса движущихся частей, силы трения, площади поршня в напорной и сливной плоскостях.

Скорость наложения давления, интервалы наложения давления и максимальную величину давления выбирают по результатам предварительных исследований, исходя из зависимости давления от времени.

Для высокопрочных алюминиевых сплавов необходимо накладывать давление $p=500$ МПа, при котором относительное уменьшение объема жидкого металла составляет 12,8%. В этом случае фиксируется качественно новое состояние металла, когда, с одной стороны, перегрев над линией ликвидус составляет ~ 200 К, а, с другой стороны, атомы теряют подвижность и происходит резкое повышение вязкости расплава. Когда температура в тепловом центре слитка достигает значения ниже температуры 150-200 К, давление снимается, плунжеры отводятся в исходное положение, форма раскрывается, полученный слиток извлекается и охлаждается до цеховой температуры.

Предлагаемый способ является универсальным, для управления процессом кристаллизации алюминиевых сплавов.

На рис. 49 представлена разработанная общая структура системы управления.

Во время работы прессы в автоматизированном режиме ПЛК1 выбирает начальные значения $x(t)=p_0(t)$, $x_0(t)$, $v_0(t)$ из программы, 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 $|p_{эксн}| < 0,2 * |p_{mat}|$, 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.

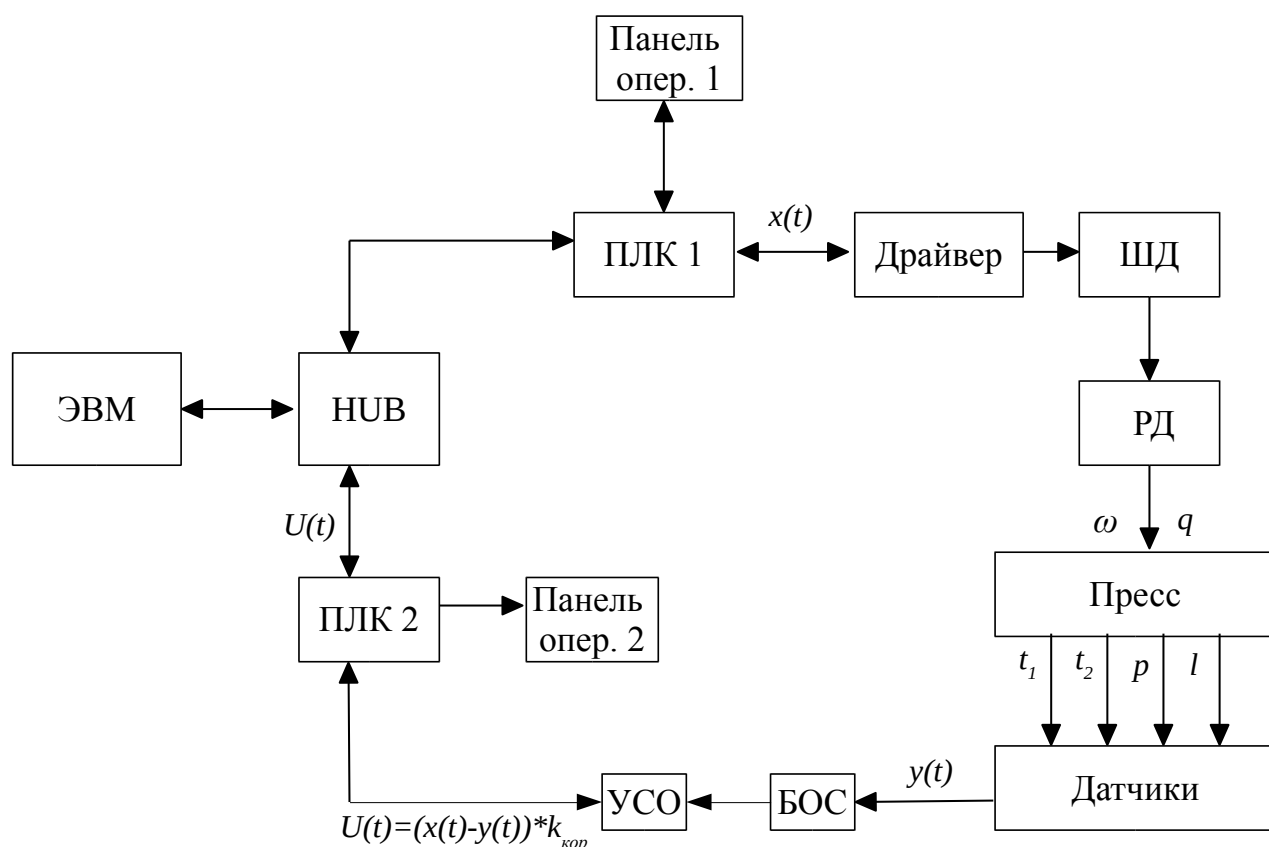


Рисунок 49. Общая структура системы управления

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 [112].

Программируя скорость движения прессующих плунжеров, следует изменять положение дросселя в магистрали подачи рабочей жидкости в полость гидроцилиндра, а необходимая точность отработки закона наложения давления обеспечивается с помощью определения точных настроек ПИД – регулятора.

В разрабатываемой системе работа ПИД-регулятора реализована на программном уровне и определена таким образом: разница показаний давления, получаемых во время эксперимента и показаний, заложенных в программу, умножается на настроечный коэффициент. Полученный показатель (мощность) подается на выход исполнительного устройства. Пропорциональная составляющая начинает работу в момент возникновения рассогласования. На объект управления оказывают воздействия внешние возмущения: масса плунжеров, сжимаемость жидкости, трение, поэтому в цепь добавлена интегральная составляющая, компенсирующая внешние возмущения. Такое решение обеспечивает стабилизацию мощности.

Между воздействием и реакцией системы возникают задержки [113], для их компенсации добавлена дифференциальная составляющая. В обычных условиях [114] пропорциональный регулятор выдает мощность на постоянной основе, до тех пор, пока давление не выйдет на заданный режим; пропорционально-дифференциальный регулятор начинает снижать подаваемую мощность до того, когда прессующие плунжеры дойдут до заданной точки. В этом случае рассогласование уменьшается, возникает отрицательная производная, уменьшающая воздействие внешних возмущений [115]. Такой подход обеспечивает минимальное давление в системе при длительных переходах и обеспечивает управление процессом на заданном уровне.

Состояние объекта определяется: 1) давлением и 2) перемещением.

На каждом шаге работы регулятора задается текущее положение дроссельной заслонки в регуляторе. Шаговый двигатель управляет величиной зазора щели, т.е. гидравлическим сопротивлением. В итоге можно перейти к такой записи:

$$\text{Изменение Шага } (t+1) = \text{Функция } \{\text{Ошибка}(t)\}$$

Управление частотой вращения электродвигателя осуществляется в тот момент, когда регулятор давления повернут в крайнее положение, в этой связи, увеличивается диапазон и точность управления. Функция, определяющая предельное значение угла поворота шагового двигателя выглядит таким образом:

$$\text{Предел ШД}(t) = \text{Шаг}(t+1) - \text{Шаг}(t)$$

Предел шагового двигателя будет равен нулю в том случае, когда шаг будет четко соответствовать требуемому.

Для частоты функция будет выглядеть следующим образом:

$$\text{Частота } (t+1) = \text{Предел ШД}(t) \text{ Частота}(t) + \text{Функция } \{\text{Ошибка}(t)\}$$

Для реализации поставленных задач предлагается программное регулирование давлением рабочей жидкости на выходе из гидросистемы пресса по заданному закону. Выбран блок системы управления технологическим процессом литья с кристаллизацией под давлением, который предназначен для сбора, обработки и передачи информации с датчиков температуры, давления и линейного перемещения прессующих плунжеров. Поэтому, проектируемая система должна принимать информацию по аналоговым и цифровым портам, обеспечивать перевод информации в нормированные значения, сравнивать с законом и в случае рассогласования корректировать подачу рабочей жидкости в гидросистему.

Из вышесказанного следует, что система управления гидравлическим прессом в режиме реального времени получает всю необходимую информацию о технологическом процессе (линейное перемещение прессующих плунжеров, давление в системе, температура металла и формы) с контрольно-

измерительной системы; полученная информация через устройства связи с объектом (УСО) передается на ПК, являющейся пультом оператора. ЭВМ обрабатывает информацию и сравнивает ее с заданными значениями, находящимися в базе данных. Если в базе данных отсутствуют результаты уже проделанных технологических операций, то система принимает решение на основе данных занесенных оператором в управляющую программу. В случае, если система распознает рассогласования основных значений технологического процесса от сгенерированного закона наложения давления, АСУ вносит коррективы в технологические параметры процесса, с помощью изменения угла поворота шагового двигателя, который в свою очередь влияет на режимы наложения давления.

4.2 Разработка алгоритма и программы управления

Давление, если его рассматривать как фактор внешнего воздействия на кристаллизацию, является не только контролируемым, но и управляемым во времени параметром, а во взаимодействии с регулируемой температурой заливки и начальной температурой формы переводит процесс кристаллизации в разряд многомерных объектов управления (ММОУ).

Графически, это выглядит следующим образом (рис.50). В данном случае на входе ММОУ следующие параметры: температура заливаемого металла – x_1 ; величина давления, накладываемого на жидкий и кристаллизующийся металл – x_2 ; температура формы перед заливкой металла – x_3 ; время – x_4 . На выходе ММОУ зависящие от структуры свойства: плотность металла – y_1 ; предел прочности – y_2 ; твердость – y_3 ; относительное удлинение – y_4 .

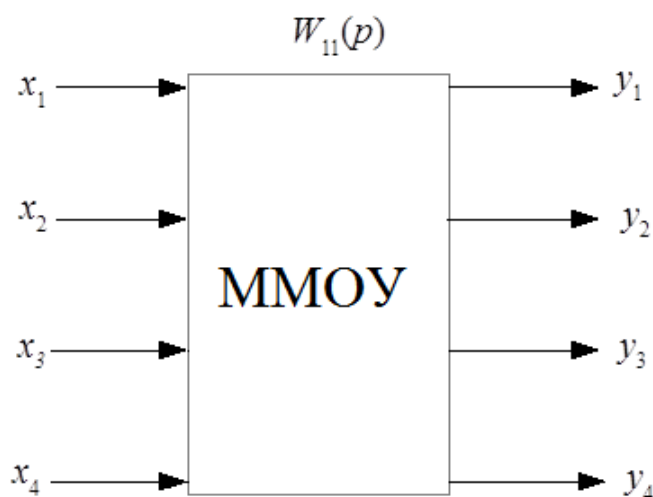


Рисунок 50. Модель объекта управления

Математическая модель ММОУ для случая, когда зависимости выходов от входов могут быть представлены дифференциальными уравнениями в частных производных (в форме Коши) в области изображений может быть представлена в следующем виде:

$$y_1(s) = W_{11}(s)x_1(s) + W_{12}(s)x_2(s) + W_{13}(s)x_3(s) + W_{14}(s)x_4(s); \quad (34)$$

$$y_2(s) = W_{21}(s)x_1(s) + W_{22}(s)x_2(s) + W_{23}(s)x_3(s) + W_{24}(s)x_4(s); \quad (35)$$

$$y_3(s) = W_{31}(s)x_1(s) + W_{32}(s)x_2(s) + W_{33}(s)x_3(s) + W_{34}(s)x_4(s); \quad (36)$$

$$y_4(s) = W_{41}(s)x_1(s) + W_{42}(s)x_2(s) + W_{43}(s)x_3(s) + W_{44}(s)x_4(s); \quad (37)$$

Здесь прямые и перекрестные связи между параметрами на входе и выходе представлены через соответствующие передаточные функции $W_{ij}(s)$.

Наложение давления осуществляется в течение нескольких секунд, поэтому указанные связи проявляются не в статике, а в динамике и могут быть описаны дифференциальными уравнениями второго и более высоких порядков. Точное управление в режиме реального времени выходными параметрами путем корректировки параметров на входе потребует принятия таких решений, которые основаны на решении дифференциальных уравнений по первообразным функциям и на определении всех передаточных функций в изображениях.

С точки зрения возможности улучшения свойств конечной продукции, принципиально важно управлять таким взаимным расположением и

взаимодействием атомов, которое обеспечивает формирование как можно большего числа эффективных межатомных связей. Поэтому достижение высокой плотности y_1 важно для улучшения и других показателей свойств – y_2, y_3, y_4 .

Что касается таких параметров на входе как x_1 и x_3 , то на основании предварительных исследований их значения могут быть зафиксированы на определенном уровне, а их влияние на y_1 в формуле (34) $W_{11}(s)x_1(s)$ и $W_{13}(s)x_3(s)$ может быть представлено соответственно функциями K_{11} и K_{13} .

Безусловно, K_{11} и K_{13} , с позиций физических процессов в кристаллизующемся металле, представляют собой сложные функции, но они зависят от параметров x_1 и x_3 , которые являются контролируемыми, но не управляемыми. Поэтому исследовать влияние этих функций возможно только в эксперименте.

При зафиксированных значениях x_1 и x_3 уравнения (34), (35), (36) определяют и уравнение (37), а в уравнении (34) компоненты $W_{12}(s)x_2(s)$ и $W_{14}(s)x_4(s)$, по существу, за счет управления и определяют достижение цели управления по параметру $y_1 \rightarrow \max$.

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

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

Изменяя величину давления на заданном временном отрезке, можно воздействовать на атомы металла в различных температурных диапазонах.

С учетом вышесказанного разработан алгоритм автоматизированного управления процессом (рис. 51).

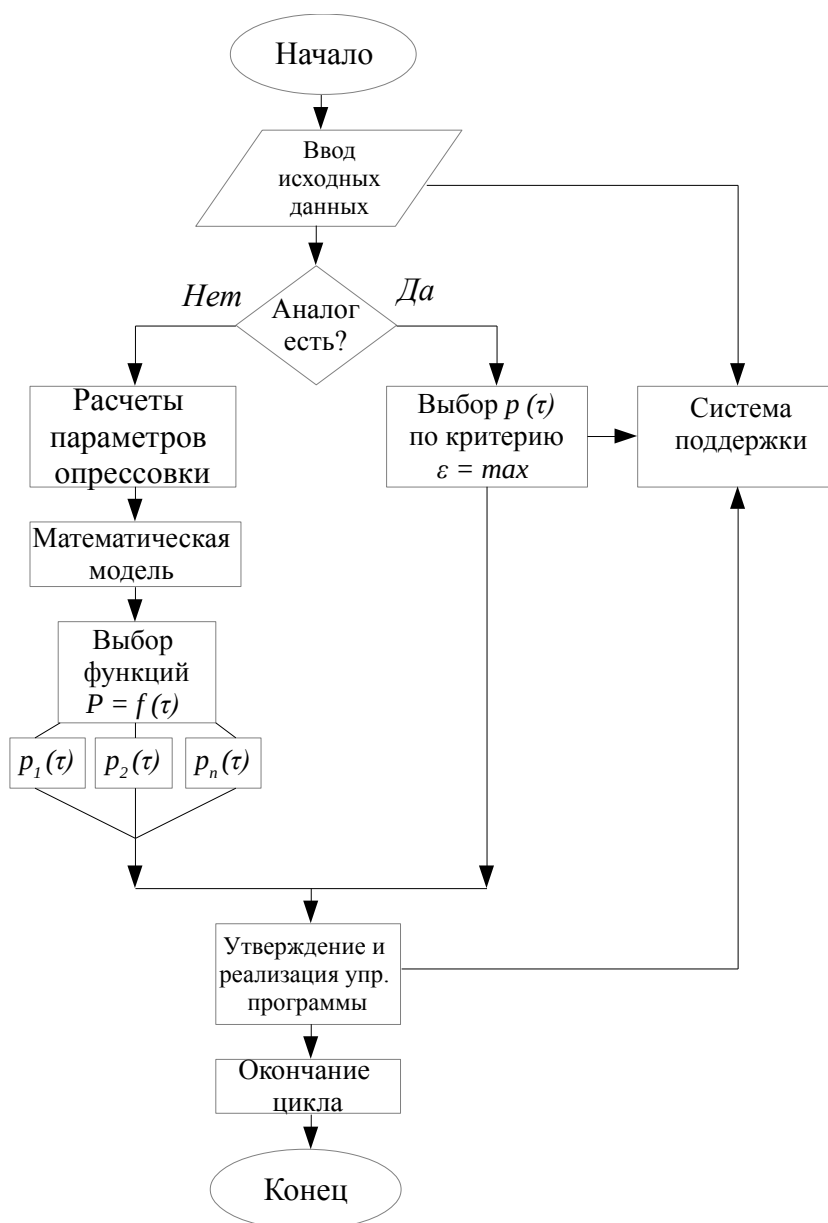


Рисунок 51. Алгоритм автоматизированного управления

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.

Алгоритм системы управления для ПЛК2 имеет следующий вид (рис. 52).

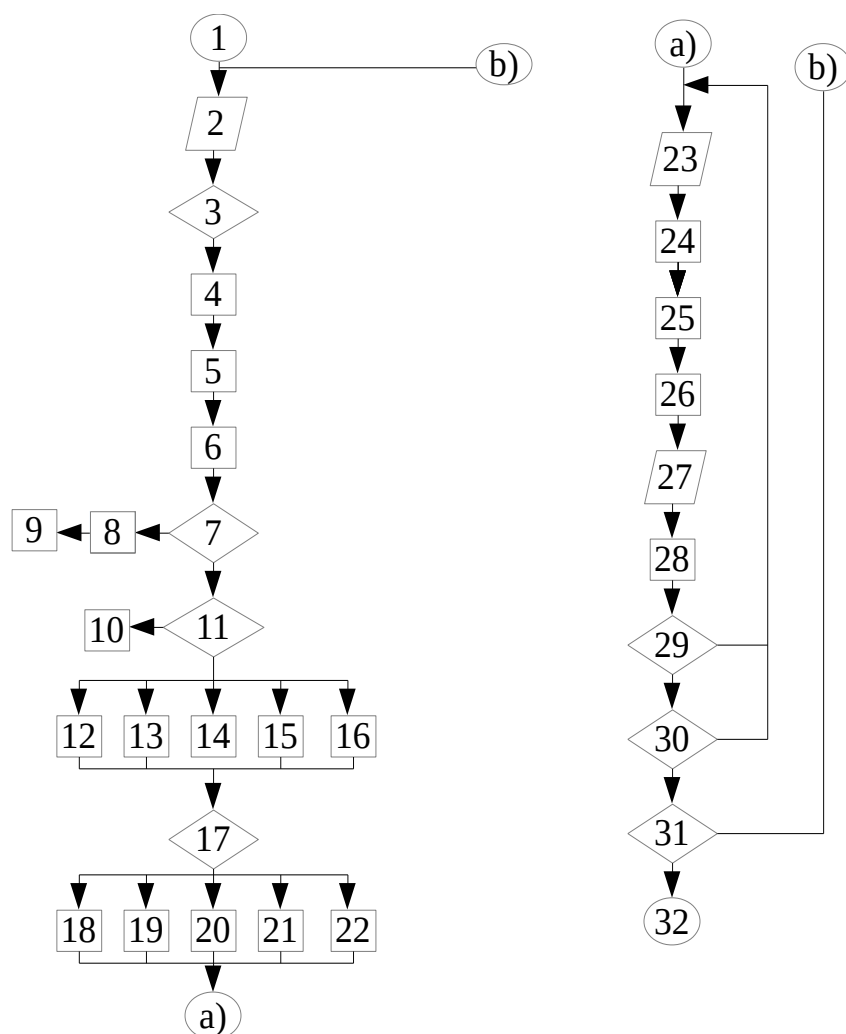


Рисунок 52. Алгоритм системы управления для ПЛК2

Действия выполняются в следующей последовательности:

- 1- Начало;
- 2- Ввод порядкового номера эксперимента, комментария и X-количества технологических режимов;
- 3- Выбор технологического процесса (технологический процесс литье с кристаллизацией под давлением);
- 4- ВКЛ насос и переместить плиту в крайнее положение;
- 5- Активация и инициализация устройств сбора данных;
- 6- Программа диагностики ПЛК1 и его модулей, входящих в систему управления;
- 7- Задание режима работы: автоматическое управление?
- 8- Генерация запроса на ПЛК1;

- 9- Переход на ПЛК1;
- 10- Основную систему в режим ожидания;
- 11- Ввод данных о сплаве;
- 12- 16 - Выбор параметров сплава;
- 16- Марка сплава, плотность, механические свойства, химические свойства;
- 17- Выбор технологических параметров работы оборудования;
- 18- 22 - Параметры регулирования, давления и скорости;
- 23- Сбор данных с АЦП;
- 24- Фильтрация данных;
- 25- Обработка данных и их преобразование единую систему измерений;
- 26- Решение дифференциальных уравнений;
- 27- Вывод на экран графиков и данных;
- 28- Подпрограмма сравнения данных;
- 29- $y=X?$;
- 30- Хотите изменить X-режимов и продолжить работу?;
- 31- Завершение работы или выбор других параметров?;
- 32- Конец программы.

В программе активации и инициализации устройств выполняется следующая последовательность действий (рис. 53, а):

- 16.1 – Начало программы;
- 16.2 – Установка связи с устройством сбора данных;
- 16.3 – Получение данных с активированных входных и выходных каналов;
- 16.4 – Опрос датчика перемещения: $Z_1 > Z_{\text{нач. процесса?}}$;
- 16.5 – Опрос датчика перемещения: $Z_1 > Z_{\text{нач. процесса?}}$;
- 16.6 – Опрос датчика давления: $P_1 > P_{\text{нач. процесса?}}$;
- 16.7 – Опрос датчика температуры: $T_1 > T_{\text{нач. процесса?}}$;

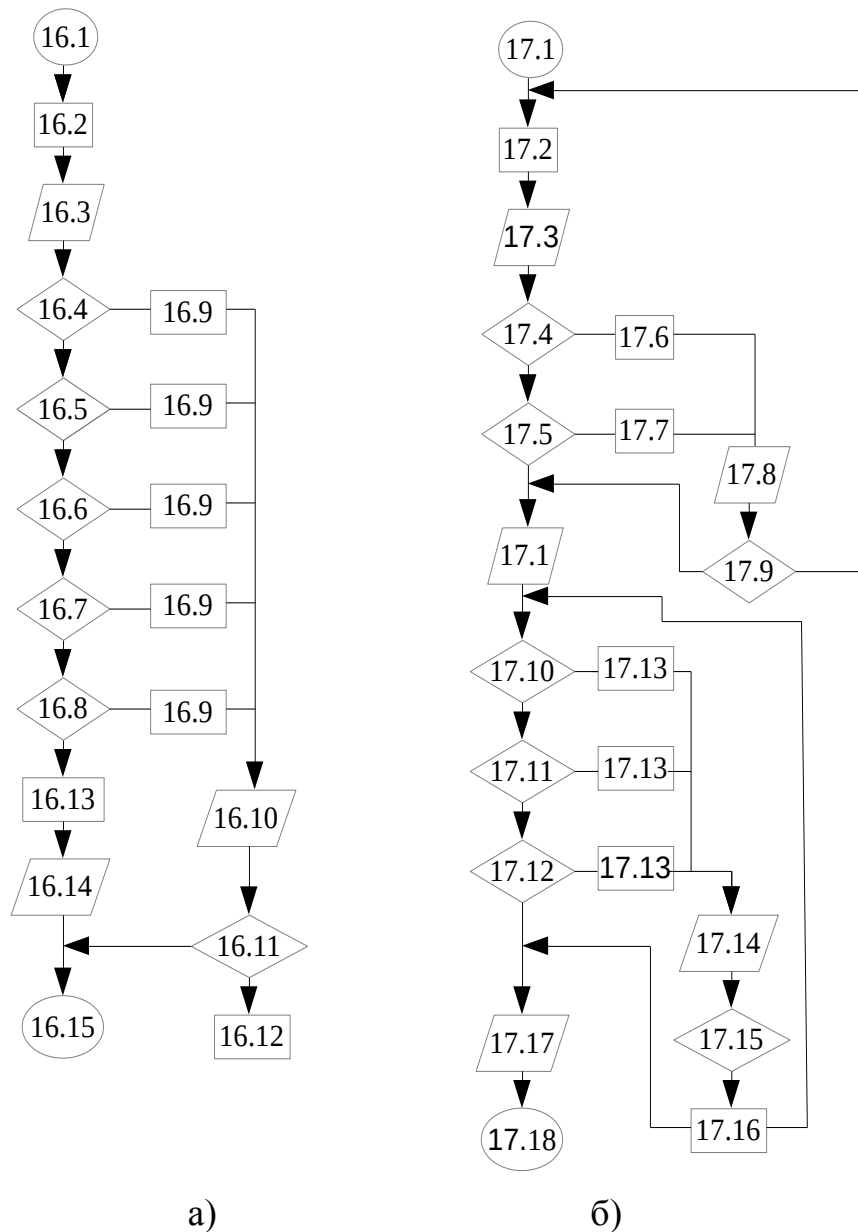
- 16.8 – Опрос датчика температуры: $T_2 > T_{\text{нач. процесса?}}$;
- 16.9 – Определение устройств, вышедших из строя;
- 16.10 – Вывод сообщения о неисправности устройств;
- 16.11 – Продолжение работы в “демо” режиме без датчика X?;
- 16.12 – Перезапуск системы;
- 16.13 – Вычисление расхождения реальных параметров и предварительно заданных $Y = X_1 / X_{\text{нач. процесса}}$;
- 16.14 – Вывод фактического коэффициента отклонения W;
- 16.15 – Конец подпрограммы.

В подпрограмме инициализации и диагностики устройств (рис. 53, б) осуществляется следующая последовательность действий:

- 17.1 – Начало подпрограммы;
- 17.2 – Отправка запроса на подключение через вход CO1;
- 17.3 – Получение ответа об активации устройств на входы CI1 и CI2;
- 17.4 – CI1=1?
- 17.5 – CI2=1?
- 17.6-17.7 – Определение нерабочих устройств;
- 17.8 – Вывод сообщение о неисправности устройств;
- 17.9 – Продолжение работы в упрощенном “демо” режиме без устройства X?;
- 17.10 – Прием, обработка и отправка информации о работоспособности модулей и устройств, которые подключены по каналам CO2, CO3, CO4, CI3, CI4, CI5, CI6, CI8;
- 17.11 – CI13 =1?;
- 17.12 – CI4 =1?;
- 17.13 – CI8 =1?;
- 17.14-18.16 – Определение устройств, вышедших из строя;
- 17.17 –Генерация необходимой информации об устройствах, вышедших из строя;

17.18 – Отправка команды на внесение информации в базу данных: ВО1 (аналоговый сигнал, указывающий на конкретные рабочие или не рабочие устройства);

17.19 – Конец подпрограммы.



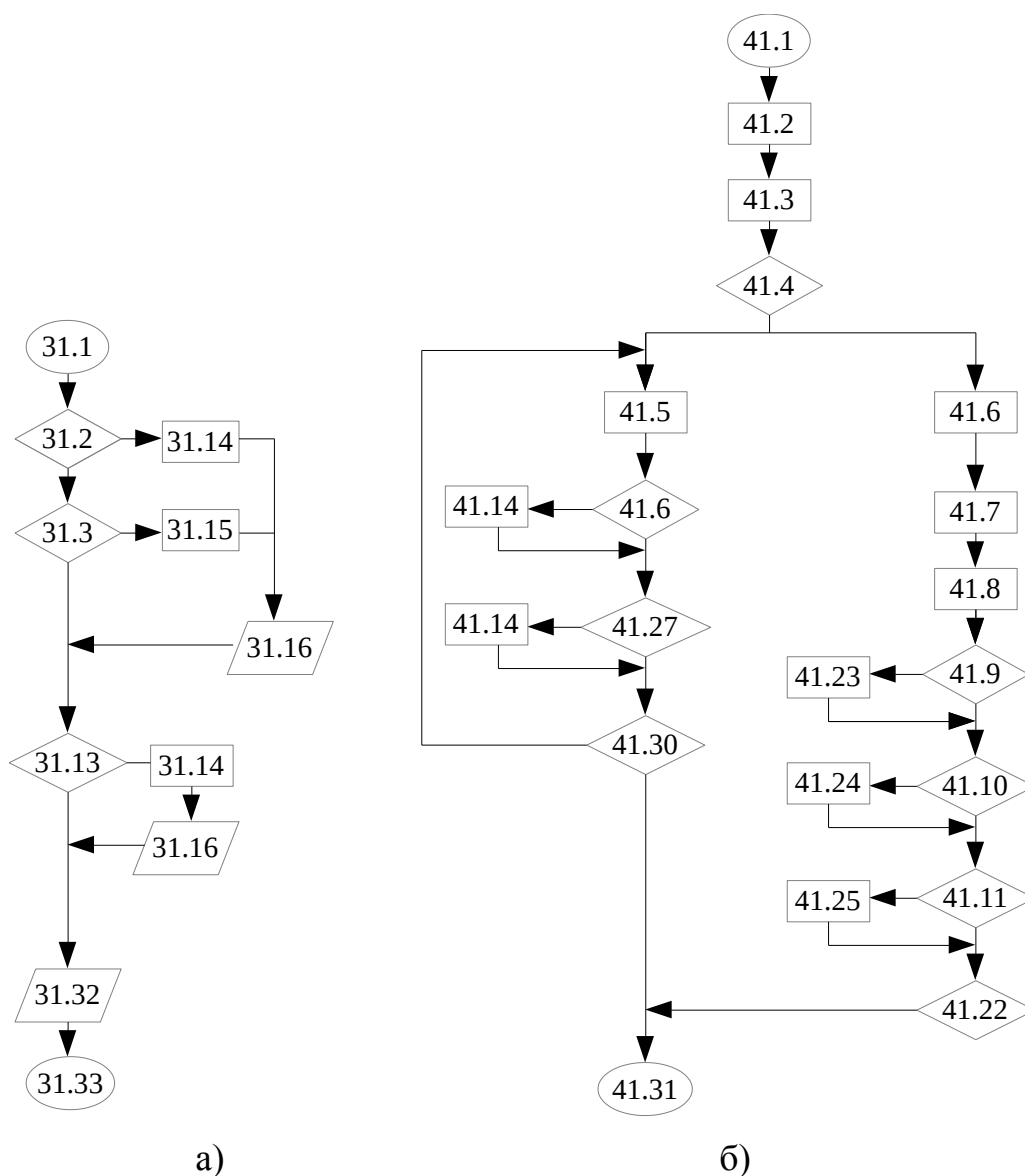


Рисунок 54. Алгоритм подпрограммы сравнения данных (а) и программы модуля ПЛК1 (б)

В подпрограмме сравнения данных (рис. 54, а) выполняются следующие действия:

31.1 – Начало подпрограммы;

31.2 – $P_1 > P_{2\text{мат. расч.}} * 0,2?$;

31.3 - $P_1 < P_{2\text{мат. расч.}} * 0,2?$;

31.4 - 31.13 – $P_1 > P_{2\text{мат. расч.}} * 0,2?$; $P_1 < P_{2\text{мат. расч.}} * 0,2?$; $v_1 < v_{2\text{мат. расч.}} * 0,2?$ и т.д.;

31.14, 31.17, 31.20, 31.23, 31.26, 31.29 – Формирование корректирующего воздействия: $k_{\text{кор}} = r_{\text{экс}} * k_t$;

31.15, 31.18, 31.21, 31.24, 31.27, 31.30 - $k_{\text{кор}} = r_{\text{экс}} * k_2$;

31.16 – Воздействие на аналоговый выход АО2;

31.19, 31.22, 31.25, 31.28, 31.31 – Воздействие на выходы системы сбора данных;

31.32 – Запись в базу данных;

31.33 – Конец подпрограммы

В программе уровня ПЛК1 (рис. 54, б) выполняется следующая последовательность действий:

41.1 – Программа ПЛК1: вкл.;

41.2 – активация инициализация устройства для сбора данных;

41.3 – Программа диагностики ПЛК1 и ПЛК2;

41.4 – Активация основной системы управления?;

41.5 – Сбор, анализ и обработка данных с цифровых и аналоговых входов;

41.6 – Инициализация предустановленных параметров;

41.7 – Сбор данных с цифровых и аналоговых входов;

41.8 – Вывод данных на ЖК-дисплей;

41.9 – Нажата кнопка 1?;

41.10 – Нажата кнопка 2?;

41.11 – Нажата кнопка 3?;

41.22 – Нажата кнопка стоп?;

41.23 – Передача значений на аналоговый выход BO2=3C (сигнал на насос);

41.24 – Передача значений на цифровой выход FO5 = 1 (сигнал на контроллер);

41.25 – Шаговый двигатель +1 шаг (сигнал на шаговый двигатель регулятора давления)

41.26 – На цифровом входе FI7=1?;

41.27 – На цифровом входе FI8=1?;

41.28 – Шаговый двигатель +1 шаг вперед;

41.29 - Шаговый двигатель +1 шаг назад;

41.30 – На цифровом входе $CI6=1?$;

41.31 – Конец.

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

Принцип работы управляющей программы заключается в коррекции и поддержании закона наложения давления на основе заданных значений или предыдущих экспериментальных данных, что приводит к созданию постоянно-обновляющейся базы данных (БД), содержащей условия проведения экспериментов, полученные результаты и соответствующие им режимы наложения давления. Данная БД позволяет накапливать информацию об экспериментальных данных, использование которых повышает эффективность управления процессом наложения давления.

4.3 Программно-аппаратная реализация АСУ ТП

Спроектирован и изготовлен шкаф управления, отвечающий за прием, обработку и передачу информации о процессе на персональный компьютер (рис. 55).



Рисунок 55. Внешний вид шкафа управления

Шкаф управления состоит из:

- программируемого 8 канального АЦП;

- промышленного источника питания, преобразующий переменное напряжение 220В в 24В;
- автоматического выключателя.

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

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

Пример протокола обмена с контроллером:

1. Настройка порта.

Скорость обмена - 38400 бод

Длина слова: 8 бит

Количество стоповых бит: 2

Контроль четности: нет

2. Управление

CTS (вх.)

= 0 - контроллер занят, обмен данными невозможен

= 1 - контроллер готов к обмену

RTS(вых.)

= 1 - режим настройки контроллера, сбор данных остановлен

= 0 - режим сбора данных (нормальная работа)

DSR (вх.)

= 1 - напряжение сети есть

= 0 - напряжения сети нет

3. Формат данных

3.1. посылка данных из контроллера

заголовок 1 байт = 55h

год 1 байт (2 последние цифры года) 0...99

месяц 1 байт 0...11

день 1 байт 0...30

час 1 байт 0...23

минута 1 байт 0...59

секунда 1 байт 0...59 (время соответствует времени получения данных для данной посылки)

длина информации из АЦП 1 байт (равно $2 \times \text{число каналов}$)

результаты измерения по каналам, начиная с канала №0

1 слово 16 бит (2 байта) на канал; младший байт передается первым;

формат: двоичное целое со знаком в дополнительном коде;

допустимые значения: $-32767 \dots +32766$ - результат измерения, 32767 = ошибка (нет ответа от АЦП, канал выключен и т.п.)

контрольная сумма CRC-16 всей посылки - 2 байта, старший первый (алгоритм см. ниже)

Физический смысл данных:

для АЦП - результат измерения

для метеостанции:

температура: град.цельсия*10 (например, -2,5 град. - код = -25)

давление: кПа*10 (например, 96,8 кПа - код = 968)

влажность: проценты от 0 до 100 (всегда целое число)

3.2. Посылка настройки контроллера

заголовок 1 байт - AAh

число включенных каналов (1...32)

на каждый канал (см. также Настройки):

- номер интерфейсного кабеля, к которому физически подключен канал (0...7)

- адрес устройства на данном интерфейсном кабеле (1...247; должен совпадать с установленным в АЦП)

контрольная сумма CRC-16

Если какой-либо канал нужно выключить, для него передается адрес устройства = 255; при этом канал не опрашивается и результат измерения этого канала всегда 32767.

Поскольку метеостанция представляет собой 3 канала в одном приборе, то каналы температуры, давления, влажности должны быть настроены на 1 интерфейсный кабель и иметь адреса по порядку (например, 40,41,42).

4. Алгоритм обмена

Нормальный сбор данных (RTS=0).

Раз в секунду по сигналу запуска от генератора контроллер дает команду на выборку данных всеми АЦП, далее опрашивает результаты измерения и формирует посылку данных; в это время CTS=0. По окончании формирования пакета контроллер устанавливает CTS=1 и немедленно после этого отправляет в ПК посылку. После этого контроллер ожидает получения из ПК 2х последних байт посылки (контрольную сумму) для проверки успешного получения. В случае неполучения ответа или неправильного ответа посылка повторяется через 30 мсек, и так до 3 раз. Если после 3 попыток отправки правильный ответ от ПК не получен, посылка уничтожается в контроллере и повторно не отправляется (данные теряются). После правильного подтверждения контроллер устанавливает CTS=0 и ожидает следующего импульса запуска.

Настройка (RTS=1).

Когда контроллер в режиме настройки готов к приему данных, он устанавливает CTS=1. ПК может отправить посылку. Контроллер не позднее чем через 80 мс после получения последнего байта отправляет в ПК последние 2 байта посылки (контрольную сумму). Если ПК их не получает или получает неправильно, он может через 20 мс повторить отправку посылки. Если посылка верна, контроллер производит свою настройку в соответствии с полученными данными; на это время он устанавливает CTS=0. По окончании процедуры и готовности контроллера CTS=1.

Переключение между режимами определяется сигналом RTS и может производиться в любое время.

При RTS=1 сбор данных не производится.

Пример программы на языке ST приведен на рис. 56.

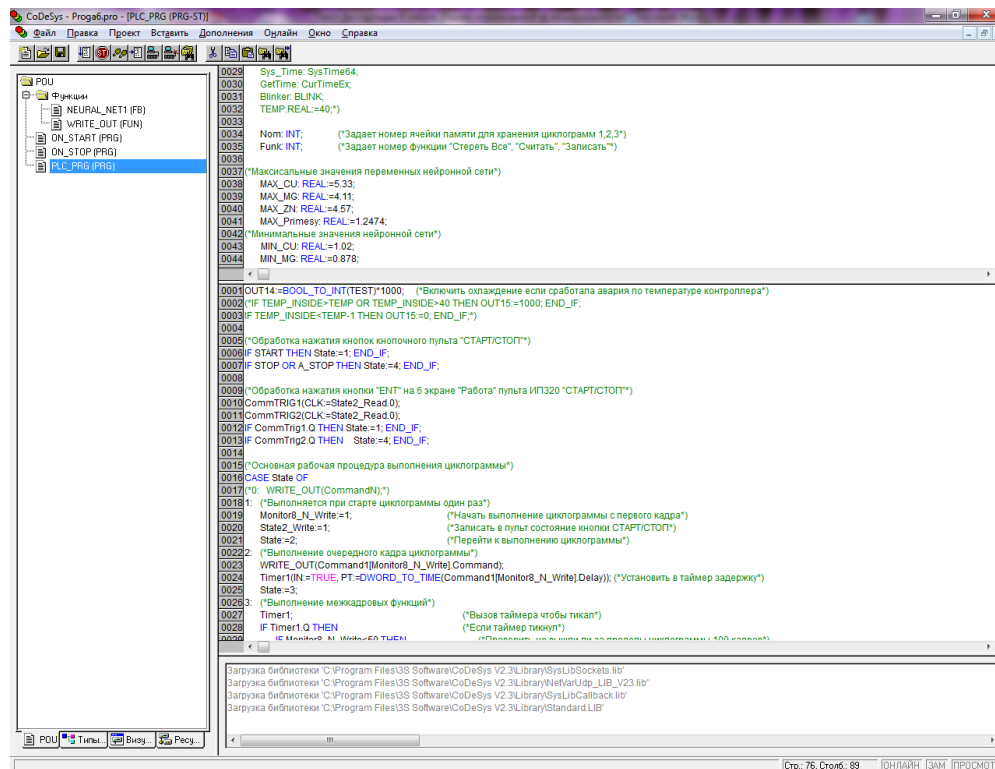


Рисунок 56. Пример программы

С помощью ST реализованы арифметические и логические операции (в том числе, побитовые), безусловные и условные переходы, циклические вычисления; используются как библиотечные, так и пользовательские функции.

Данная реализация позволяет задавать программу работы прессы в автоматизированном режиме, в соответствии с законом управления. Имеется возможность записи программы в файл на компьютере, таким образом повторное составление программы для заданного технологического процесса не требуется.

Окно запуска отработки программы представлено на рис. 57.

Оператору достаточно нажать пуск и следить за выполнением работы программы, так же на данное окно выводится значения перепада давления в прессирующем гидроцилиндре. Для снятия показаний используется электронное

реле давления EDS 300, которое является альтернативой механическим реле и контактными манометрами.

Модель, для прогноза и формирования программы, выведена для оператора и показана на рис 58.

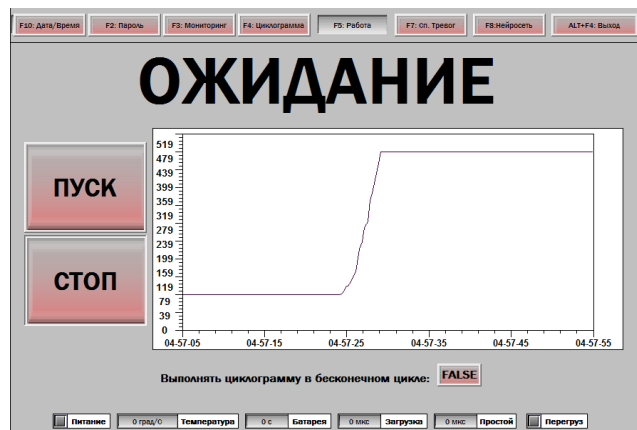


Рисунок 57. Окно работы

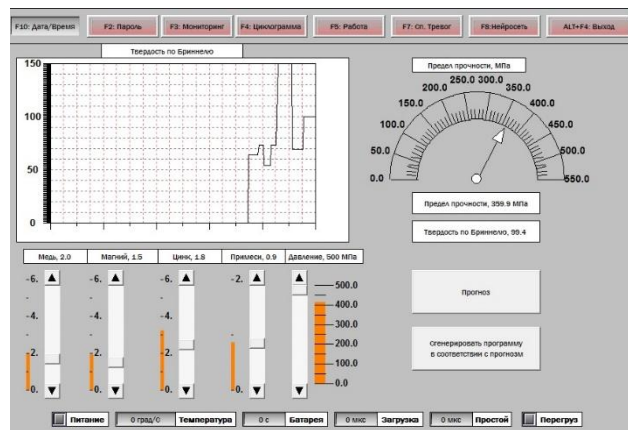


Рисунок 58. Окно прогнозирования

У оператора появляется возможность, зная входные параметры подобрать тот закон наложения давления, который соответствуют требованиям.

После выставления всех параметров, необходимо проанализировать полученные результаты, если результаты устроили оператора, то есть возможность сгенерировать программу отработки в соответствии с прогнозом, при этом система реализует алгоритм отработки и поддержания давления на требуемом уровне.

Разработанный вариант системы управления с ПКНД, относится к системам с дискретным временем [116]. Свойства объекта управления остаются неизвестными, а на основе значений закона управления система принимает решение. Непрерывное время разбивается на циклы, а циклы на шаги. Рассогласование задающего воздействия и выходной величины управляемого объекта, в нашем случае, является входной величиной. При помощи алгоритмов оценивания, на основе заданного закона, сигнал рассогласования обрабатывается и анализируется на каждом цикле. На участке идентификации по заданному показателю, измеряемому и вычисляемому в ходе технологического процесса управления, связанного с точностью и качеством

регулирования, на каждом шаге или на протяжении ряда шагов, происходит автоматический выбор модели оцениваемого процесса. В течение одного шага положение исполнительного механизма остается неизменным. Управление осуществляется при помощи принятых алгоритмов, которые являются взаимосвязанными; фильтрации информации на входе в систему, адаптации автоматически формируемой структурной и параметрической модели, и автоматически вычисляемых наиболее оптимальных управляющих воздействий.

Оценка состояния и идентификация параметров технологического процесса и характеристик объекта управления реализуется с помощью экспериментальных данных. Алгоритмы оценивания и идентификации позволяют определять структуру закона управления и воспроизводить параметры этого закона, т.е. реализовывать принципы структурной и параметрической адаптации.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований в диссертации предложено решение задачи по разработке автоматизированной системы программного управления наложением давления на жидкий и кристаллизующийся металл на базе гидравлического пресса.

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

Кроме того, в программе предусмотрено несколько режимов отображения информации и возможность вносить корректирующие коэффициенты во время работы системы.

4.4 Выводы

1. Разработанная система автоматизированного управления включает следующие блоки анализа текущего состояния работы оборудования, сравнения данных о текущем состоянии работы оборудования с моделью, программного управления технологическим процессом, что направлено на достижение заданной структуры и высоких механических свойств продукции.

2. Разработанный алгоритм автоматизированной системы управления, включающий блоки анализа работы системы гидравлического оборудования и электронных узлов, позволяет скорректировать работу в соответствии с требованиями оптимальности и закона наложения давления.

3. Анализ устойчивости и качества управления проектируемой системы показал, что система устойчива и обеспечивает необходимое качество регулирования.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ НАЛОЖЕНИЕМ ДАВЛЕНИЯ НА КРИСТАЛЛИЗУЮЩИЙСЯ МЕТАЛЛ

Разработанная система управления процессом наложения давления на кристаллизующийся металл принципиально отличается от известных аналогов и прототипов [117]. Одно из важных отличий заключается в формировании требуемых структуры и свойств заготовок, которые достигаются за счет опрессовки жидкого металла до начала кристаллизации на 8...10% под давлением 200...250 МПа, а при последующем повышении давления до 450...500 МПа осуществляется продвижение твердой фазы со скоростью 0,8...1,2 мм/с, далее опрессовка металла достигает 12%, после чего начинают выделяться квазикристаллические фазы, придающие заготовки высокую прирабатываемость и износостойкость.

Контроль над величиной и скоростью наложения давления, а также временем выдержки под давлением, температурой формы и температурой металла осуществляется с помощью разработанной контрольно-измерительной системы, входящей в состав АСУ.

За счет внедрения современной АСУ ТП предлагаемый процесс позволяет повысить производительность изготовления заготовок из высокопрочных алюминиевых сплавов. Это становится возможным благодаря уменьшению подготовительных операций, что ведет к повышению качества заготовок за счет формирования плотной, равномерной, мелкозернистой структуры во всем объеме заготовки. [118-120].

5.1 Анализ результатов физико-механических испытаний заготовок поршней ДВС из высокопрочного алюминиевого сплава

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

Формирование отливки осуществляется в специальной технологической оснастке. Оснастка изготовлена из стали 5ХНМ с твердостью в результате закалки и отпуска по серийному режиму 45...48 HRC. Толщина стенки матрицы для удержания давления жидкого металла до 500 МПа составляет не

менее 50 мм. Из полученных заготовок $\varnothing 80 \times 70$ (рис. 59) массой 1,5 кг вырезали образцы для последующих физико-механических испытаний и исследований микроструктур.

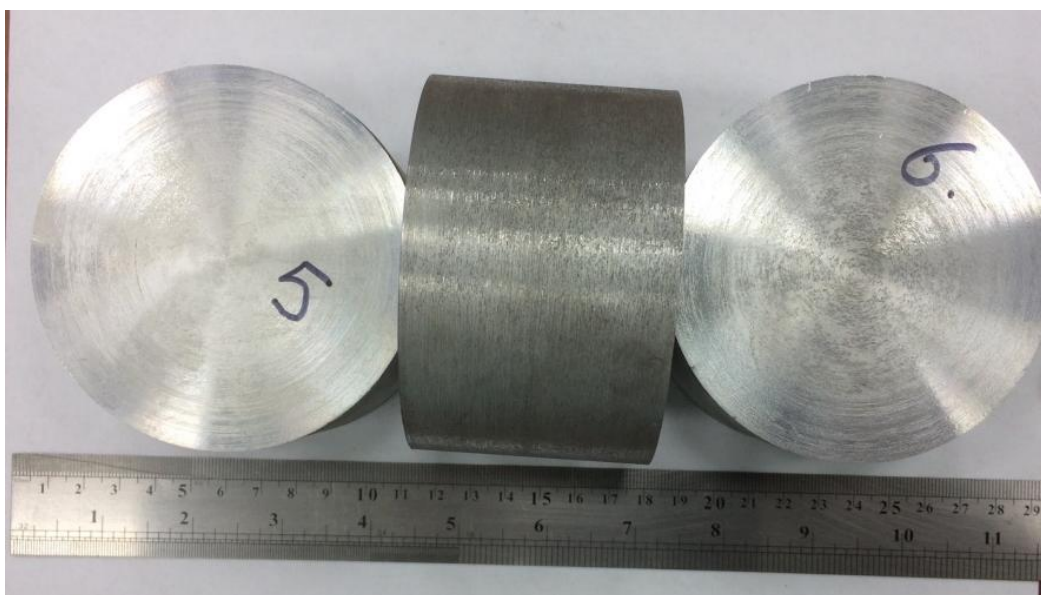


Рисунок 59. Заготовки поршня ДВС

Для исследования микроструктуры используется растровый электронный микроскоп FEI Quanta 200 3D, который, позволяет вести наблюдения образца во вторичных электронах и отраженных электронах. Ускорение и фокусировка пучка происходит в колонне, вверху которой находится электронная пушка. Система электронной оптики формирует узкий зонд, а также позволяет отклонять его в сторону, направляя в определенные точки образца. Образец окружен аппаратурой — детектором отражённых электронов, детектором вторичных электронов, рентгеновским спектрометром. Образцы исследуются в вакуумной среде с разрешением 10000 крат, что позволяет изучить микронеоднородность поверхности образца (Рис. 60).

Подготовка образцов к микроструктурным исследованиям включала механическое шлифование с применением абразивных материалов с последующим электрополированием в электролите при температуре 70...90 °С и плотности тока 0,7...0,9 А/дм². Электролит представляет собой раствор серной и фосфорной кислоты и хромовый ангидрид.

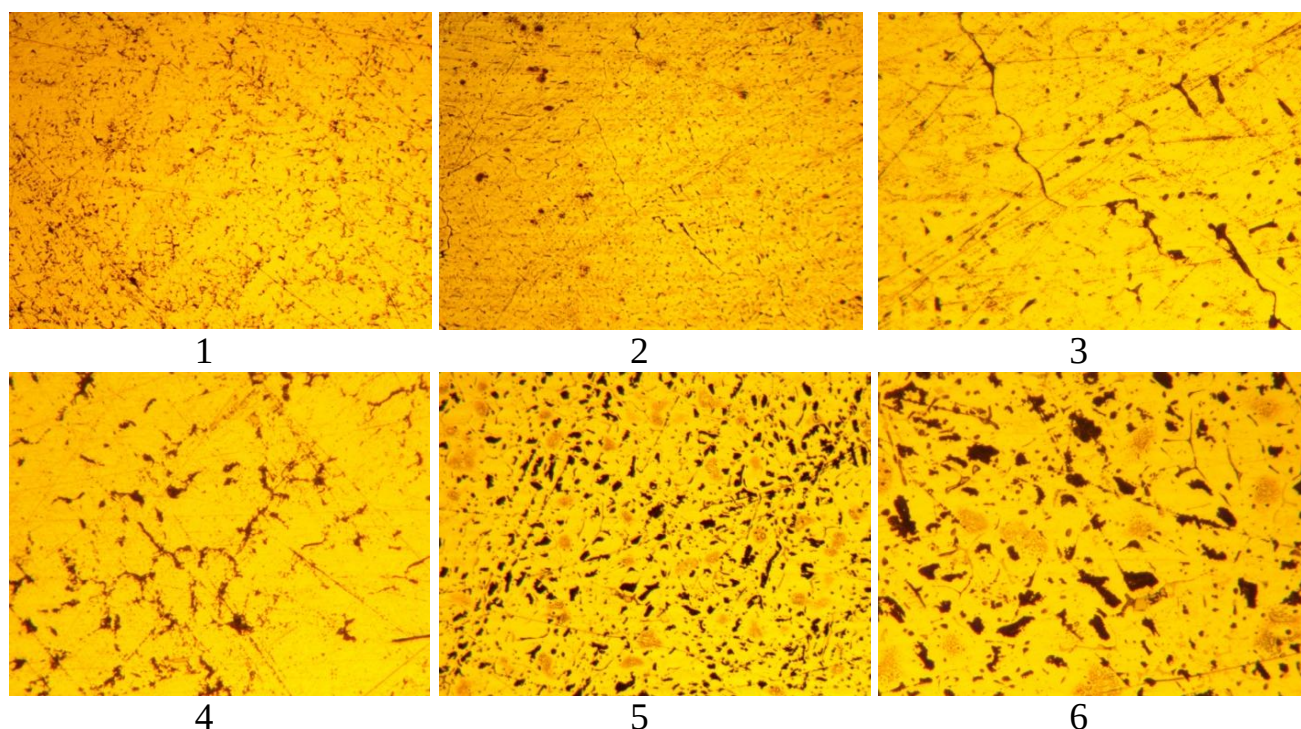


Рисунок 60. Микроструктура алюминиевого сплава В95 после обработки по различным режимам ($\times 200$). Режимы обработки приведены в таблице 16.

На микроскопических снимках (рис. 60) алюминиевого сплава, кристаллизация которого проходила по третьему и шестому режимам обработки (см. табл. 16), 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.

Таблица 16. Режимы опрессовки алюминиевого сплава В95

№, режима наложения давления (РНД)	Способ обработки	t , с	p , МПа	T_{ϕ} , °C	$T_{м}$, °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.

Пример кривых, характеризующих режим наложения давления (закон наложения давления), представлен на рис. 61.

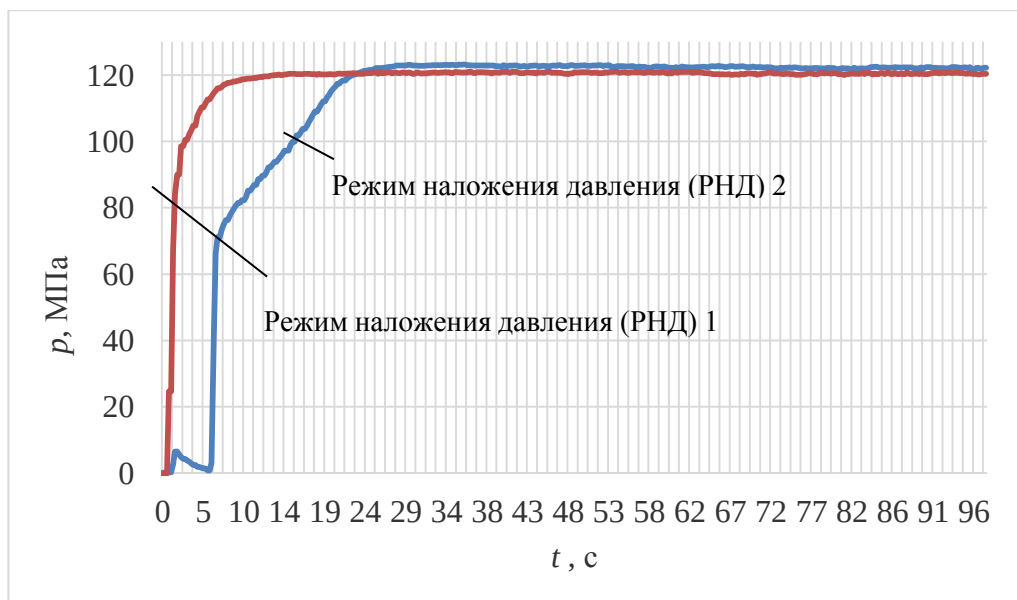


Рисунок 61 . Кривые изменения давления во времени

Наложение давления, приводит к сближению атомов, создает условия для конкурентного роста из большего числа центров. В этом смысле влияние давления аналогично влиянию переохлаждения [121]. Обращает внимание отсутствие границ зерен. Дендритные ячейки плотно спрессованы по прямым линиям.

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

Механические испытания образцов (рис. 62) проводились на универсальной электромеханической машине с компьютерным управлением серии WDW – 100E. Все образцы имели одинаковые геометрические размеры и изготовлены в соответствии с ГОСТ 1497-84.

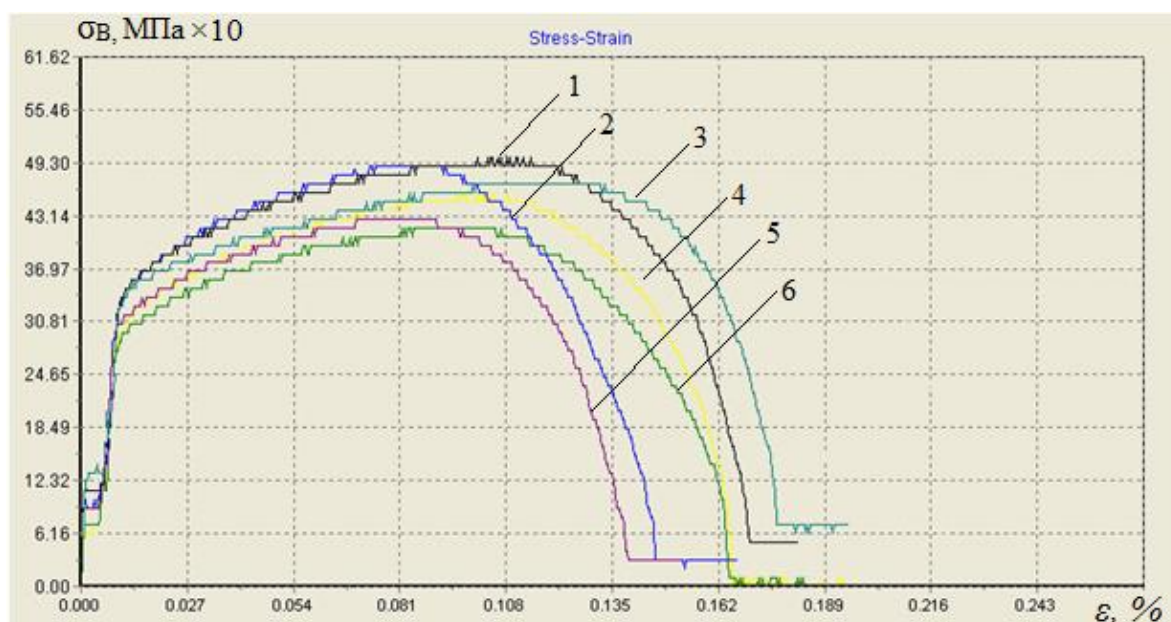


Рисунок 62. Кривые деформации алюминиевого сплава В95. Режимы обработки приведены в таблице 16.

Анализ диаграмм испытаний на разрыв показал что, образцы, полученные по первому режиму, проявляют не только более высокую прочность, но и более высокую пластичность, т.е. более высокую энергию разрушения. Улучшение механических свойств под влиянием давления, прежде всего, связано, с уплотнением металла в местах расположения микропор, микрорыхлот, а также с опрессовкой межзеренных границ.

Для измерения твердости по Бринеллю в соответствии с ГОСТ 23677-79 использовался твердомер ТШ-2 (табл. 17).

Таблица 17. 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, показывают, 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.

Анализ результатов физико-механических и структурных исследований показал, что разработанная технология обеспечивает общее повышение физико-механических свойств сплава без изменения его химического состава. [122].

5.2 Исследование влияние давления на выделение скрытой теплоты кристаллизации

Анализ результатов, зафиксированных с помощью датчиков температуры, позволил установить (рис. 63), что наложение давления уменьшает время выделения скрытой теплоты кристаллизации с ~ 60 до ~ 30 с. И если общее количество теплоты, которое выделилось из слитка пропорционально площади под кривой охлаждения, то факт заметного изменения энергетического уровня атомов под влиянием давления можно считать установленным. Следовательно, технология наложения давления, параметры процесса и управляющие воздействия направлены на обеспечение компенсации, уменьшение объема соответственно количеству теплоты, отведенной от расплава.

Дело заключается в том, что скорости охлаждения из расплавленного состояния до цеховой температуры не так велики, чтобы неравновесное состояние, которое было зафиксировано под давлением, можно было сохранить в процессе охлаждения.

Установлено, что опрессовку расплава необходимо проводить с целью перевода структуры в состояние сильно удаленное от равновесного, а последующим быстрым охлаждением перевести металл в область температур, когда диффузионные процессы и фазовые превращения замедлены или остановлены.

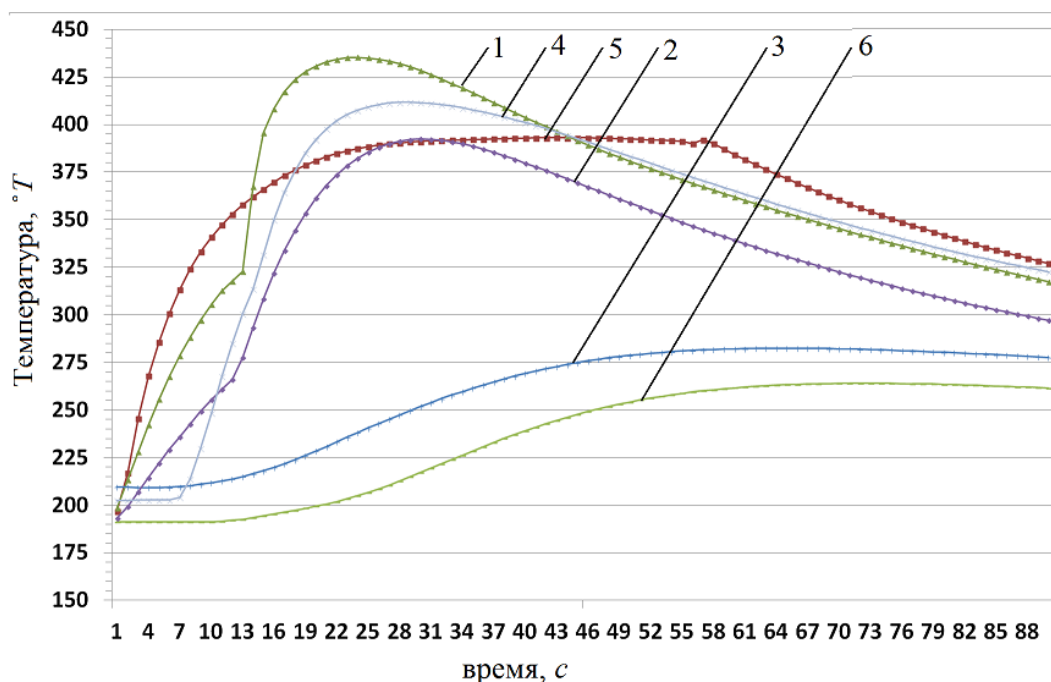


Рисунок 63. Кривые охлаждения алюминиевого сплава В95, где цифры от 1 до 6 соответствуют режиму наложения давления из таблицы 16

Использование подобной технологии при обработке алюминиевого сплава сложного состава, типа сплава В95 позволяет зафиксировать состояние близкое к аморфному, которое в зависимости от температуры и времени выдержки переводится в состояние с теми или иными сочетаниями прочностных и пластических свойств [123].

Стоит отметить, что положительное влияние ускоренного охлаждения в процессе кристаллизации на структуру и механические свойства металлов и сплавов известно [124]. Возможность реализации высоких скоростей охлаждения (10^4 - 10^6 °C/с) при кристаллизации обеспечивает повышение целого комплекса свойств различных сплавов. Технологии сверхбыстрой кристаллизации при условии высокого наложения давления применительно к алюминиевым сплавам особенно эффективны, т.к. позволяют формировать конкурентоспособные физико-механические свойства по отношению к сплавам на основе магния и даже железа, что в значительной степени расширяет область их применения.

Воздействие кинетического фактора, приводящего к диспергированию элементов литой структуры, объясняет повышение физико-механических свойств быстрокристаллизующихся металлов и сплавов. Нужно отметить, что термодинамический фактор также оказывает существенное влияние, определяет метастабильный характер равновесия между жидкой и твердой фазами в условиях повышенной скорости охлаждения в процессе кристаллизации.

С увеличением скорости охлаждения значительно измельчаются все фазовые и структурные компоненты, например, частицы вторичных фаз, микропоры и микрорыхлоты.

Быстрое наложение высокого давления, и как следствие высокая скорость охлаждения металла способствует развитию процесса метастабильной кристаллизации, одним из проявления которой является образование пересыщенного твердого раствора [125]. Необходимо отметить, что дополнительное насыщение твердого раствора во время повышения скорости охлаждения в процессе кристаллизации сплава установлено как в объеме зерен, так и на их границах.

Предполагается, что в процессе сжатия атомов в бесструктурном состоянии происходит их сближение. До наложения давления на каждый атом приходится среднестатистическая доля объем:

$$\delta V = \frac{V}{N},$$

где V – объем расплава; N – число атомов.

В свою очередь, δV является функцией от температуры и давления

$$\delta V = f(t, p).$$

Таким образом, наряду с диспергированием всех структурных компонентов происходит упрочнение твердого раствора в объеме зерен и на их границах, а также рост объемной доли этих границ. Это является одной из причин значительного повышения прочностных характеристик сплава, полученного с использованием технологии ПКНД.

5.3 Влияние давления на сжимаемость алюминиевых сплавов

С использованием разработанной КИС были установлены зависимости перемещения прессующих плунжеров от режима наложения давления (рис. 64).

Анализируя полученные данные, стоит обратить внимание, что наложение давления по первому режиму (1) протекает в течение первых 3 секунд, после чего расплав перестает сжиматься, это фиксируется контрольно-измерительной системой и отображается в показаниях движений плунжеров.

Во время опрессовки металла по режиму (5) процесс наложения давления протекает совсем по другому закону, плунжеры сначала быстро в течение 1,5 с входят в металл, а затем по экспоненте продолжают движение, металл на протяжении 30 с продолжает сжиматься, пока полностью не закристаллизуется.

Зафиксированные значения наглядно отображают влияние режимов наложения давления на контролируемые и управляемые параметры, а также позволяют совершенствовать подходы управления выбранного технологического процесса.

Приведенные зависимости сжимаемости расплава от величины давления и времени его наложения построены для частного случая настройки системы управления.

Установлено, что функция управления процессом рассчитывается или строится по экспериментальным данным. Это контролируемая функция, а закон наложения давления выступает и как контролируемая, и как управляемая функция.

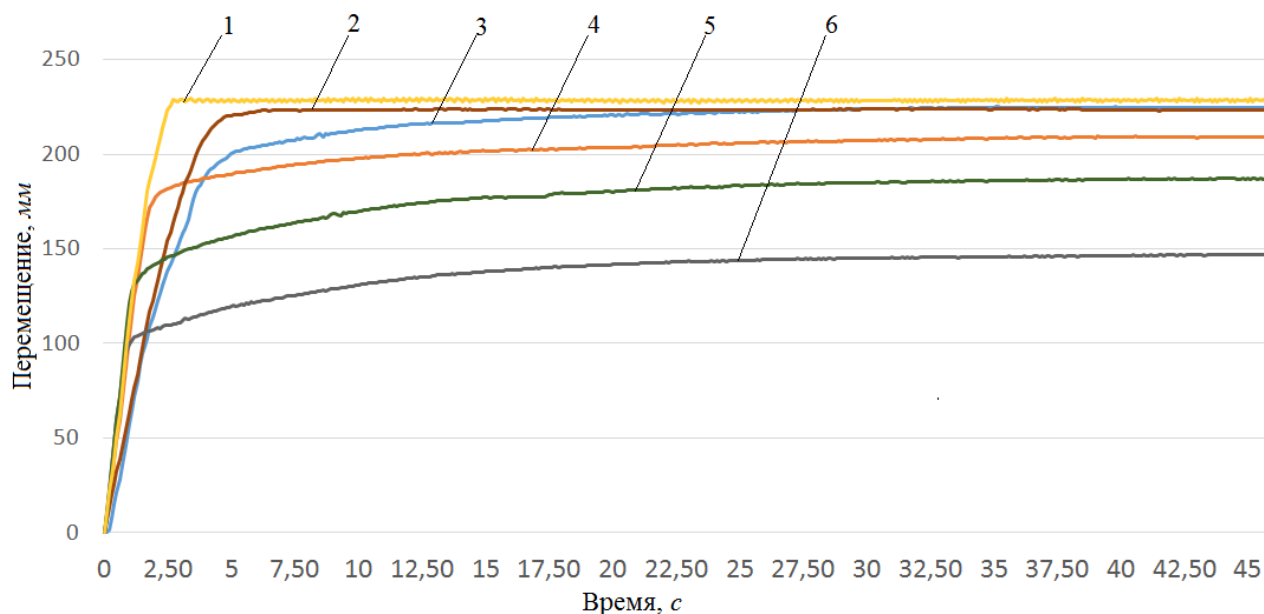


Рисунок 64. Суммарное перемещение плунжеров в процессе наложения давления

Предлагается процесс, в котором в соответствии с разработанной АСУ ТП формообразование, кристаллизация, компенсация усадки, подавление ликвации, формирование требуемых структуры и свойств металлопродукции протекают последовательно в неразрывной связи по заранее заданной траектории.

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.

Полученные экспериментальным путем результаты позволили установить факторы, которые существенно влияют на механизм кристаллизации, к таким факторам можно отнести:

- кинетический фактор;
- термодинамический фактор;
- технологические факторы давления.

Совместные воздействия названных факторов позволяют эффективно повышать структурные и физико-механические характеристики получаемых заготовок.

Приведенные в работе результаты экспериментальных исследований получены благодаря современным программно-аппаратным средствам в составе АСУ ТП. Данные средства позволяют с высокой скоростью принимать, обрабатывать и передавать информацию.

Таким образом, проектирование и внедрение современных автоматизированных систем, позволяющих контролировать характер и уровень межатомных связей и взаимодействий, позволит влиять, а значит, и целенаправленно изменять свойства металлопродукции.

На основе исследований выявлены параметры, требующие контроля и управления, разработан подход к автоматизации оборудования, включающий поддержание заданных значений давления в гидросистеме пресса, контроль скорости и перемещения прессующих плунжеров.

Таким образом, подтверждена целесообразность и перспективность дальнейшего развития технологии ПКНД применительно к высокопрочным алюминиевым сплавам. Предложенный экспериментальный технологический цикл изготовления заготовок может стать основой для промышленного внедрения процесса, с целью изготовления деталей и изделий, не уступающих по прочностным характеристикам, ведущим зарубежным алюминиевым сплавам средней и повышенной прочности.

Результаты могут быть использованы промышленными предприятиями и исследовательским сообществом.

5.4 Выводы

1. Изложены результаты экспериментальных исследований управления технологическим процессом. Приведены результаты физико-механических испытаний и структурных исследований полученных образцов.

2. Экспериментально подтверждено, что наложение давления на кристаллизующийся металл может быть использовано для формирования однородной структуры в массивных стенках отливок изготавливаемых из высокопрочных алюминиевых сплавов.

3. Разработанная технология ПКНД успешно апробирована при производстве заготовок поршней ДВС. Полученные заготовки $\varnothing 80 \times 70$ мм можно рекомендовать для изготовления поршней двигателей внутреннего сгорания.

4. Установлено, что управление формированием структуры возможно, за счет заранее заданного режима наложения давления на кристаллизующийся металл.

5. Предложен алгоритм управления динамикой наложения давления с учетом закона изменения коэффициента сжимаемости расплава. В соответствии с управляющей программой осуществляется контроль соответствия фактического коэффициента сжимаемости в данный момент времени значению, предусмотренному по программе, и в случае обнаружения ошибки система управления вырабатывает необходимое управляющее воздействие.

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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Пилипенко, А.В. Адаптивная система управления нестационарным технологическим процессом формоизменения. [Текст] / А.В. Пилипенко // Информационные системы и технологии. 2011. 4/46. С. 115-119.
2. Семёнов Б.И., Бочаров Ю.Ф., Куштаров К.М. и др. Современные технологии формообразования в твердожидком состоянии // КШПОМД. 2006. № 10. С. 3–14; № 11. С. 3–13.
3. Лахтин Ю.М. Материаловедение: учебник / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 1980. – 494с.
4. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. Учебник для вузов. / Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: МИСиС, 1999. – 416 с.
5. Арзамасов Б.Н. Материаловедение: учебник для вузов / Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина.-М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.-648с.
6. Семёнов Б.И., Куштаров К.М. Современные тенденции совершенствования технологий заготовительных производств // Металлургия машиностроения. 2003. № 2. С. 29–40; № 4. С. 26–31.
7. Семёнов Б.И., Мельников Н.А. Принципы и техпроцессы получения точных заготовок из сплавов, находящихся в твердожидком состоянии // Металлургия машиностроения. 2001. № 1. С. 36–43.
8. Белопухов А.К. Литье под давлением. Инженерная монография. М.: Машиностроение, 1975. – 338 с.
9. Токов Е.Ю. Фазовые превращения соединений при высоком давлении. Справочник. Кн. 1, 2. М.: Металлургия, 1988.
10. Чернов Д.К. Д. К. Чернов и наука о металлах [Текст] / [Сост., вступ. статья и коммент. проф. Г. З. Нессельштрауса] ; Под ред. акад. Н. Т. Гудцова. - Ленинград ; Москва : изд. и тип. Metallurgizdata в М., 1950. - 564 с., 8 л. ил. : ил.; 23 см.

11. Flemings M.C. Behavior of Metal Alloys in the Semisolid State // Metallurgical Transactions A. 1991. Vol. 22A. P. 957–981.
12. Fan Z. Semisolid Metal Processing // Int. Mater. Rev. 2002. Vol. 47. P. 49–85.
13. Atkinson H.V. Modelling the semisolid processing of metallic alloys // Progress in Materials Science. 2005. Vol. 50. P. 341–412.
14. Hugh J. McQueen, Stefano Spigarelli, Michael E. Kassner and Enrico Evangelista. Hot Deformation and Processing of Aluminum Alloys — CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. XXXII, 564 p. — ISBN-13: 978-1-4200-1768-7.
15. Макаров Г.С. Формообразование сплавов в твердожидком состоянии // Технология легких сплавов. 1996. № 5. С. 37–45.
16. Фридляндер И.Н. Алюминиевые сплавы – перспективный материал в машиностроении. «Машиностроение и инженерное образование», №5, 2007.
17. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 2001. 367 с.
18. Андриевский Р.А. Наноструктурные материалы – состояние разработок и применение // Перспективные материалы. 2001. № 6. С. 5–11.
19. Бланк В.Д., Эстрин Э.И. Фазовые превращения в твердых телах при высоком давлении. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. — 412 с.
20. Физическое материаловедение: Учебник для вузов: В 6 т./Под общей ред. Б.А. Калина. – М.: МИФИ, 2008. Том 5. Материалы с заданными свойствами/ М.И. Алымов, Г.Н. Елманов, Б.А. Калинин, А.Н. Калашников, В.В. Нечаев, А.А. Полянский, И.И. Чернов, Я.И. Штромбах, А.В. Шульга. – М.: МИФИ, 2008. – 672 с.
21. Конкевич В.Ю., Лебедева Т.И., Кирилянчик А.С., Первов М.Л. Наследование свойств литой структуры быстрозакристаллизованных алюминиевых сплавов деформированными полуфабрикатами / // Технология легких сплавов. –2010. – № 2. – С. 49–58.

22. Liddicoat, P.V. *et al.* Nanostructural hierarchy increases the strength of aluminium alloys. *Nat. Commun.* 1:63 doi: 10.1038/ ncomms1062 (2010).
23. Yu, H. *et al.* A new insight into ductile fracture of ultrafine-grained Al-Mg alloys. *Sci. Rep.* 5, 9568; DOI:10.1038/srep09568 (2015).
24. Баталин Г.И., Белобородова Е.А., Казимиров В.П. Термодинамика и строение жидких сплавов на основе алюминия. М.: Металлургия, 1983. 160 с.
25. Григорович В.К. Электронное строение и термодинамика сплавов железа. – М.: Наука, 1970. – 292 с.
26. Вейник А.И. Метод приложения термодинамики необратимых процессов к решению задач литейного производства. Сборник «Теплообмен между отливкой и формой». Под ред. А.И. Вейника. – Минск: Вышэйшая школа. 1967. С.5-17.
27. Коростлев В.Ф., Хромова Л.П. Управление формированием квазикристаллической структуры и свойств сплавов специального назначения. М.: Издательство «Новые технологии» – 208 с.: ил.
28. Коростелев В.Ф., Хромова Л.П., Рассказчиков А.Н. Управление процессом кристаллизации сплава В95 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009, №8. С. 18-24.
29. Коростелев В.Ф., Хромова Л.П. Исследование межатомных взаимодействий с использованием данных об изменениях физико-механических свойств сплавов // Нано- и микросистемная техника. 2010. №2. С. 8-13.
30. Коростелев В.Ф. Поверхностное и объемное упрочнение сплавов. М.: Издательство "Новые технологии" 2013, 208 с.: ил.
31. Коростелев В.Ф. Теория, технология и автоматизация литья с наложением давления. М.: Издательство "Новые технологии" 2004, 224 с.:ил.
32. Трухов А.П., Основы теории формирования отливки. Учебное пособие.: МГТУ МАМИ, 2010. 246 с.
33. Белов Н.А. Фазовый состав алюминиевых сплавов. М.: МИСиС, 2009. 235 с.

34. Любов Б.Я. Кинетическая теория фазовых превращений. М.:Металлургия, 1969.

35. Борисоглебский Ю.В., Галевский Г.В., Кулагин Н.М., Минцис М.Я., Сиразутдинов Г.А. Металлургия алюминия / – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999. – 438 с.

36. Колонаков А.А. Повышение качества современных поршневых сплавов/ А.А.Колонаков, А. В. Кухаренко, В. Б. Деев, И. Ф. Селянин// ОАО «РУСАЛ Новокузнецк», Сибирский государственный индустриальный университет, г.Новокузнецк, 2008.-586с.

37. Пат. 2239511Российская Федерация, МПК В 21 К 1/18 (2000.01). Способ изготовления крупногабаритных поршней двигателей внутреннего сгорания / Левин И. В., Сухих А. Ю., Шибанов А. С., Оськин В. П.; заявитель и патентообладатель ОАО Верхнесалдинское металлургическое производственное объединение. – №2003112101/02; заявл. 24.04.03; опубл. 10.11.04.

38. Пат. 2467830 Российская Федерация, (51) МПК В 22 F 3/14 (2006.01), С 22 с 1/04 (2006.01), С 22 С 21/00 (2006.01) Способ производства заготовок из быстрозакристаллизованных алюминиевых сплавов / Конкевич В. Ю., Лебедева Т. И., Бочвар С. Г.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество “Всероссийский институт легких сплавов” (ОАО “ВИЛС”). – №2011136572/02 заявл. 05.09.11; опубл. 27.11.12. Бюл. №33.

39. Батышев А.И., Батышев К.А., Станчек Л., Смолькин А.А., Шрамко Т.Я. Пуансонное прессование затвердевающих отливок из силуминов // Известия МГТУ «МАМИ» № 1(19), 2014, т. 2.

40. Денисов М.С. Литье с кристаллизацией под давлением как способ получения металлических заготовок с элементами наноструктуры. НАНО : материалы VI всерос. конф. по наноматериалам с элементами научной школы для молодежи. – Москва. 22-25 ноября 2016 г. / Сборник материалов. – М.: ИМЕТ РАН, 2016, – С. 342-344.

41. Абросимова Г.Е., Аронин А.С. Тонкая структура ГЦК нанокристаллов в сплавах на основе Al и Ni // ФТТ. 2002. Т44. С. 961.
42. Louzguine D.V., Inoue A. Non_Cryst J. Solids. 311, 281. 2002.
43. Абросимова Г.Е., Аронин А.С. Влияние размера на образование дефектов в нанокристаллах // Физика. Химия. 2008. Вып. 1. С. 6–13.
44. Ягодкин Ю.Д., Свиридова Т.А. Атомное строение фаз.- М.: МИСиС, 2007.- 107 с.
45. Падалко А. Г. Практика горячего изостатического прессования неорганических материалов. — М.: Академкнига, 2007. — 267 с.
46. Золоторевский В.С., Белов Н.А. Металловедение литейных алюминиевых сплавов. М.: МИСиС, 2005. 376 с.
47. Осинцев О.Е. Высокопрочные быстрозакристаллизованные алюминиевые сплавы систем Al-Zn-Mg и Al-Zn-Mg-Cu / О.Е. Осинцев, В.Ю. Конкевич // Технология легких сплавов. – 2010. – №1. – С. 157–163.
48. Антонец Я.К., Богушевский В.С. Система управления машиной литья под давлением // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2014. – №2. – С. 3–7.
49. Нестеров, А.Л. Проектирование АСУ ТП. Книга 1 / А.Л. Нестеров и др. /Издат.:ДЕАН – 2006.
50. Yan Liu, Daming Jiang, Wenlong Xie, Jie Hu, Boran Ma. Solidification phases and their evolution during homogenization of a DC cast Al – 8.35Zn – 2.5Mg – 2.25Cu alloy // Materials Characterization. 2014. No. 93. P. 173–183.
51. Akopyan T. K., Belov N. A. Approaches to the design of the new high-strength casting aluminum alloys of 7xxx series with high iron content // Non-ferrous Metals. 2016. No. 1. P. 20–27. DOI: 10.17580/nfm.2016.01.04.
52. Ceschini L., Morri A., Sambogna G. The effect of hot isostatic pressing on the fatigue behavior of sand-cast A356-T6 and A204-T6 aluminum alloys // Journal of materials processing technology. 2008. No. 204. P. 231–238.
53. Терехов В. А., Тюкин И. Ю. Адаптивные системы управления: проблемы и тенденции // Труды всероссийской конференции «Управление и

информационные технологии».— Т. 1.— Санкт-Петербург: ИСПО - Сервис, 2003.— С. 145–154.

54. Keshtkar, S. and Poznyak, A., Tethered Space Orientation via Adaptive Sliding Mode, *Int. J. Robust. Nonlin. Control*, 2016, vol. 26, no. 8, pp. 1632–1646.

55. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2005. Vol. 13. No. 4. P. 559_576.

56. Leva A., Cox C., Ruano A. Hands-on PID autotuning: a guide to better utilization. IFAC Professional Brief. - <http://www.ifac-control.org>.

57. Quevedo J., Escobet T. Digital control: past, present and future of PID control // *Proceedings of the IFAC Workshop*, Eds., Terrassa, Spain, 5_7 Apr. 2000.

58. Терехов В. А., Тюкин И. Ю. Эволюция и проблемы теории адаптивных систем управления. Часть I // *Мехатроника, автоматизация, управление*.— 2003. № 6. — С. 9 –18.

59. Aseltine J. A., Mancini A. R., Sarture C. W. A survey of adaptive control systems// *IRE Trans. on Automatic Control*.— 1958.— Vol. AC-6, no. 12.— Pp. 102–108.

60. Падалко А. Г., Белов Н. А., Веселов А. Н., Таланова Г. В. Термография фазовых превращений в доэвтектическом силумине Al – 7 % Si – 0,5 % Mg при высоких давлениях и температуре // *Металлы*. 2009. № 1. С. 73–78.

61. Затонский А.В. Теоретические основы позиционного управления системами со скрытыми свойствами. Дисс. д.т.н. М., 2009 г. – 285 с.

62. Li Y., Ang K.H, Chong G.C.Y. Patents, soft_ware, and hardware for PID control. An overview and analysis of the current art // *IEEE Control Systems Magazine*. Feb.2006. P. 41_54.

63. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers // *Trans. ASME*. 1942. Vol. 64. P. 759_768.33. O'Dwyer A. PID compensation of time delayed processes 1998_2002: a survey // *Proceedings of the American Control Conference*, Denver, Colorado, 4_6 June 2003. P. 1494_1499.

64. Пью Х. Л. Механические свойства материалов под высоким давлением. Т. 1 / под ред. Е. Г. Понятовского. — М. : Мир, 1973. — 296 с.
65. Мирошниченко И.С. Закалка из жидкого состояния. М.: Металлургия, 1982. 168 с.
66. Акопян Т. К., Белов Н. А., Кайбышев Р. О., Алабин А. Н. Влияние жидкостного горячего изостатического прессования на структуру и свойства нового экономнолегированного высокопрочного литейного алюминиевого сплава АЦ6Н0,5Ж // Цветные металлы. 2014. № 11. С. 104–109.
67. Кирилянчик А.С. Деформируемые полуфабрикаты из наноструктурных частиц быстрозакристаллизованных алюминиевых сплавов / А.С. Кирилянчик, В.Ю. Конкевич // Технология машиностроения. – 2010. – № 4. – С. 5–7.
68. Денисов М.С. «Разработка компьютерной системы управления процессом литья с кристаллизацией под давлением», Computational Nanotechnology, 2016 №2, с. 146-152.
69. Денисов М.С., Разработка системы регулирования реализованной на принципах структурной и параметрической адаптации. Computational nanotechnology, 2017 №2, с. 114-116.
70. Одинг, С.С. Адаптивное программное управление процессом обтяжки профильных заготовок из алюминиевых сплавов / С.С. Одинг, И.А. Кретов. – С.40-44 : ил.
71. Антонов, Н.В. Адаптивное управление в технических системах / Н.В. Антонов, В.А. Терехов, И.Ю. Тюкин / Учебное пособие. – СПб. Издательство С.- Петербургского Университета 2001. – 244.
72. Александровский Н.М., Егоров С.В., Кузин Р.Е. Адаптивные системы автоматического управления сложными технологическими процессами М.: Энергия, 1973 - 272 с.
73. Денисов М.С. Технология изготовления заготовок поршней ДВС с использованием адаптивной системы управления технологическим процессом. Новые материалы : материалы III междисциплинарного молодежного науч. форума с

междунар. участием. – Москва. 21-24 ноября 2017 г. / Сборник материалов. – М.: ООО «Буки Веди», 2017, – С. 679-684.

74. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами // Анализ и синтез нелинейных систем.— СПб.: Наука, 2000.— 549 с.

75. Живоглядов В. П. Адаптация в автоматизированных системах управления технологическими процессами. Фрунзе: Илим, 1974. С. 227.

76. Жмудь В.А. Адаптивные системы автоматического управления с единственным основным контуром // Автоматика и программная инженерия. 2014, №2(8).

77. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: Учеб. пособие. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 464 с.

78. Теория автоматического управления: учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика»: в 2 ч. 2-е изд. / А. А. Воронов, Д. П. Ким, В. М. Лохин и др.; под ред. А. А. Воронова. М.: Высш. шк., 1986. Ч. II. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления.

79. Власов К. П. Теория автоматического управления: учебное пособие. Харьков: Гуманитарный центр, 2007.

80. Воронов А. В. Основы теории автоматического управления. М.; Л.: Энергия, 1965. Т. 1, 2.

81. Адаптивные системы автоматического управления: учебное пособие / В. Н. Антонов, А.М. Пришвин, В. А. Терехов, А. Э. Янчевский; под ред. В. Б. Яковлева. Ленинград: Изд-во Ленингр. ун-та, 1984.

82. Бугров С. В., Лисовой Р. А., Жмудь В. А., Колкер А. Б. Адаптивная система управления с использованием стабилизирующего эффекта девиации коэффициента регулятора // Научный вестник НГТУ. 2010. № 1(38). С. 157–160.

83. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник в 5 т. / Под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. М.: Изд-во

МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2004. т. 5. Методы современной теории автоматического управления.

84. Чаки Ф. Современная теория управления. Нелинейные, оптимальные и адаптивные системы / Пер. с англ.; под ред. Н. С. Райбмана. М.: Мир, 1975.

85. Ким Д. П. Теория автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. 2-е изд., испр. и доп. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2007. Т. 2.

86. Куропаткин П. В. Теория автоматического управления: учебное пособие для электротехн. специальностей вузов. М.: Высш. шк., 1973.

87. Самонастраивающиеся системы. Справочник / Под ред. П. И. Чинаева. Киев: Наукова думка, 1969.

88. Красовский А. А. Теория самоорганизующегося оптимального регулятора с экстраполяцией // Современная прикладная теория управления (в 3-х частях). Ч. I. «Оптимизационный подход в теории управления» / Под ред. А. А. Колесникова.— Таганрог: ТРТУ, 2000.— С. 268–311. 1973. С. 616.

89. Narendra K. S., Lin Y.-H. Design of stable model reference adaptive controllers Application of Adaptive Control. London: Academic Press, 1980. P. 100-130.

90. А. Г. Александров, “Синтез регуляторов по показателям точности и быстродействию. II. Неминимально-фазовые объекты”, Автомат. и телемех., 2017, № 6, 3–17; Autom. Remote Control, 78:6 (2017), 961–973.

91. Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P. Nonlinear and Adaptive Control Design.— Wiley and Sons Inc., 1995.

92. В. Ю. Рутковский, В. М. Глумов, “Особенности динамики адаптивной системы управления с нелинейной эталонной моделью. II”, Автомат. и телемех., 2017, № 5, 83–95; Autom. Remote Control, 78:5 (2017), 836–846

93. В. Ю. Рутковский, В. М. Глумов, “Особенности динамики адаптивной системы управления с нелинейной эталонной моделью. I”, Автомат. и телемех., 2017, № 4, 92–105; Autom. Remote Control, 78:4 (2017), 654–665.

94. Aseltine J. A., Mancini A. R., Sarture C. W. A survey of adaptive control systems// IRE Trans. on Automatic Control.— 1958.— Vol. AC-6, no. 12.— Pp. 102–108.

95. Bellman R., Kalaba R. Dynamic programming and adaptive control processes: Mathematical foundations // IRE Trans. on Automatic Control.— 1960.— Vol. AC-5.— Pp. 5–10.

96. Morse A. S., Mayne D. Q., Goodwin G. C. Applications of hysteresis switching in parameter adaptive control // IEEE Trans. on Automatic Control.— 1988.— Vol. 37, no. 9.— Pp. 1343–1354.

97. Коростелёв В.Ф., Хромова Л.П., Денисов М.С. Исследование зависимости свойств сплава В95 от величины давления, накладываемого на кристаллизующийся металл // Металловедение и термическая обработка. 2017. №2. С. 13-18.

98. Патент РФ № 180716, 21.06.2018. Устройство для литья с кристаллизацией под давлением // Патент России / Денисов М.С.

99. Патент РФ № 2563398, 12.11.2013. Устройство для изготовления поршней двигателя внутреннего сгорания // Патент России / Коростелев В.Ф., Хромова Л.П., Килин В.М., Денисов М.С., Большаков А.Е.

100. Островский Г.М. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч.П. – СПб.: НПО «Профессионал», 2006. – 916 с., ил.

101. Пилипенко, А.В. Абашин В.Г., Пилипенко А.П. Исследование и модернизация математической модели работы гидропрессового оборудования // Промышленные АСУ и контроллеры. 2013. №8. С. 26-33.

102. Ibrahim Ozbek. A study on the re-solution heat treatment of AA 2618 aluminum alloy // Materials Characterization. 2007. Vol. 58, No. 3. P. 312–317.

103. Korostelev, V.F. Process control of steel production / V.F. Korostelev, A.E. Bolshakov // Europ. Appl. Sci. 2013. №2. P.195—197.

104. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. М.: Машиностроение. 2004. – 576 с.
105. В.Ф. Коростелев, М.С. Денисов, А.Е. Большаков, Чан Ван Хиеу Разработка процесса производства заготовок из высокопрочных сплавов на основе алюминия, Металлы, №5, 2017 с . 14-19.
106. Иглин С.П. Теория вероятностей и математическая статистика на базе MATLAB. Харьков: НТУ "ХПИ", 2006,-612 стр.
107. С.В. Поршнева MATLAB 7. Основы работы и программирования. Учебник. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2006,-320 стр.
108. М.Л. Подкур, П.Н. Подкур, Н.К. Смоленцев Программирование в среде Borland C++ Builder с математическими библиотеками MATLAB М.: ДМК Пресс, 2006 – 496 с.: ил., CD.
109. В. П. Дьяконов Matlab 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Основы применения. М.: Солон-Пресс, 2005.-800с.
110. Petrov P., Konstantinova S., Buchvarov G., Petrov I. Hot isostatic pressing treatment of AlSi7Mg aluminium alloy // J. Mater. Sci. and Technol. 1994. No. 2. P. 26–33.
111. Патент РФ № 2657668, 20.05.2016. Способ управления процессом кристаллизации алюминиевых сплавов при литье под давлением // Патент России / Коростелев В.Ф., Денисов М.С., Большаков А.Е.
112. Паршева Е. А. Децентрализованное адаптивное управление по выходу многосвязными объектами с запаздыванием по состоянию //Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. №5. С. 14 22.
113. Krstic M., Wang H.-H. Stability of extremum seeking feedback for general nonlinear dynamic systems // Automatica.— 2000.— Vol. 36.— Pp. 595–601.
114. Паршева Е. А., Цыкунов А. М. Адаптивное управление объектом с запаздывающим управлением со скалярным входом-выходом //Автоматика и телемеханика. 2001. №1. С. 142 149.

115. Bastin G., Gevers M. Stable adaptive observers for nonlinear time-varying systems // IEEE Trans. on Automatic Control.— 1988.— Vol. 33, no. 7.— Pp. 650–658.

116. Ишимцев Р. Ю. Обоснование структуры и критериев оптимизации САУ непрерывного технологического процесса // Сборник научных трудов НГТУ. Новосибирск, 2008. № 2(52). С. 3–10.

117. Патент РФ № 2674543, 11.12.2018. Способ производства поршней двигателей внутреннего сгорания из алюминиевых сплавов // Патент России / Денисов М.С., Коростелёв В.Ф., Хромова Л.П.

118. Денисов М.С. Разработка управляющей программы для процесса опрессовки поршней двигателей внутреннего сгорания // Computational Nanotechnology. 2015. №2. С. 46-50.

119. Коростелёв В.Ф., Денисов М.С. Разработка процесса литья для штампованных заготовок поршней автомобильных форсированных двигателей // Металловедение и термическая обработка. 2016. №9. С. 58-59.

120. Денисов М.С. Повышение физико-механических свойств поршней ДВС на основе автоматизации управления процессом наложения давления на кристаллизующийся металл, Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2018 №4-2., с 124-135.

121. Ягодкин Ю.Д., Свиридова Т.А. Атомное строение фаз. М.:МИСиС. 2007. 107 с.

122. Семенов Б.И. Производство изделий из металла в твердоточном состоянии. Новые промышленные технологии : учеб. пособие / Б.И. Семенов, К.М. Куштаров. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 223, [1] с. : ил., цв. вкл. 8 с.

123. Коростелёв В.Ф., Денисов М.С. Влияние скорости наложения давления на структуру и механические свойства алюминия А99 // Технология металлов. 2017. №1. С. 2-7.

124. Кузеев И.Р., Куликов Д.В., Закирничная М.М., Мекалова Н.В. Физическая природа разрушения: учеб. пособие. Уфа: Изд_во УГНТУ, 1997. 168 с.

125. Верещагин В.Ф., Кабалкина С.С. Рентгеноструктурные исследования при высоком давлении. М.: Наука, 1979. 98 С.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Листинг программы корректируемого наложения давления на кристаллизующийся металл

Программа позволяет управлять комплексом для литья с кристаллизацией под давлением в ручном и автоматизированном режиме по заранее заданному закону управления.

Дополнительно в программу включен модуль прогнозирования твердости выходного изделия, в зависимости от химического состава металла и режима наложения давления.

При использовании программного продукта используется операционная система Microsoft Windows не старше 98 версии.

Программа используется для работы с программируемыми логическими контроллерами фирмы ОВЕН.

Для реализации поставленной задачи был выбран язык программирования ST (Structured Text).

Объем программы: 339,2 КБ

ПЛК-1

```
(* @NESTEDCOMMENTS := 'Yes' *)
(* @PATH := '\Функции' *)
(* @OBJECTFLAGS := '0, 8' *)
(* @SYMFILEFLAGS := '2048' *)
FUNCTION_BLOCK NEURAL_NET1
VAR_INPUT
(* Входные значения*)
    CU: REAL;
    MG: REAL;
    ZN: REAL;
    Primesy: REAL;
    DAVLENIE:INT;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    OUT: REAL;
    DAV: REAL;
END_VAR
VAR
(*Весовые коэффициенты*)
    WES1: ARRAY [0..3,0..4] OF REAL;
```

```

WES1B: ARRAY [0..3] OF REAL := -7.56268767466861E-001, -
1.53525433706963E+000, -7.66169993500454E-001, -2.32011764600529E+000;
WES2: ARRAY [0..3] OF REAL := -4.34990404735818E-001, -4.40988129090874E-001,
6.03070578797701E-001, 4.45671992414554E-001;
WES2B: REAL :=1.53051618932909E-001;
(*Максимальные и минимальные переменные для нормализации*)
MAX_INPUT: ARRAY [0..4] OF REAL := 5.33000000000000E+000,
4.11000000000000E+000, 4.57000000000000E+000, 1.24740000000000E+000,
5.00000000000000E+002;
MIN_INPUT: ARRAY [0..4] OF REAL :=1.02000000000000E+000, 8.78000000000000E-
001, 2.37000000000000E-002, 5.90000000000000E-001, 0.00000000000000E+000;
MAX_TAR: REAL :=107.0;
MIN_TAR: REAL:= 65.0;

input: ARRAY [0..4] OF REAL; (*Переменная входных значений*)

(*Переменные дополнительные*)
delta: REAL;
i: INT;
j: INT;

V_OUT: ARRAY [0..3] OF REAL;

OUTPUTHB: REAL;
END_VAR
(* @END_DECLARATION := '0' *)
WES1[0,0] := 7.53455647811034E-001;
WES1[0,1] := -4.01941409782735E-001;
WES1[0,2] := 1.07843861065053E+000;
WES1[0,3] := 1.63910442082489E+000;
WES1[0,4] := 5.46641944197218E-002;
WES1[1,0] := -4.42492274413882E-001;
WES1[1,1] := 1.16456801356585E+000;
WES1[1,2] := 6.98125510486307E-001;
WES1[1,3] := 5.49905931343532E-002;
WES1[1,4] := 1.99342393501625E+000;
WES1[2,0] := 1.68567066717692E+000;
WES1[2,1] := 1.45208545757883E-001;
WES1[2,2] := -1.90990597742427E+000;
WES1[2,3] := 3.16917900810200E-001;
WES1[2,4] := -4.58727166427159E-001;
WES1[3,0] :=1.39872969075292E+000;
WES1[3,1] := 3.66352593878827E-001;
WES1[3,2] := 3.01427039877235E+000;
WES1[3,3] := 3.02328229843784E-001;
WES1[3,4] := 2.21823048048931E+000;

input[0]:=CU;
input[1]:=MG;
input[2]:=ZN;
input[3]:=Primesy;

```

```

input[4]:=DAVLENIE; (*Давление*)

(*Нормализация входных данных*)
FOR i:= 0 TO 4 BY 1 DO
    delta := (1-0)/(MAX_INPUT[i]-MIN_INPUT[i]);
    input[i] := 0 - delta*MIN_INPUT[i]+ delta*input[i];
END_FOR;

(*Подсчёт выходного значения твердости*)
    (*Расчет первого скрытого слоя*)
    FOR i:=0 TO 3 BY 1 DO

        V_OUT[i]:=0.0;

        FOR j:=0 TO 4 BY 1 DO
            V_OUT[i]:= V_OUT[i]+(WES1[i,j])*input[j];
        END_FOR;
        V_OUT[i]:= V_OUT[i]+WES1B[i];
        V_OUT[i] := EXP(V_OUT[i]);

    END_FOR;

    (*Расчет выходного слоя*)
    OUTPUTHB:=0.0;
    FOR j:=0 TO 3 BY 1 DO
        OUTPUTHB:= OUTPUTHB+(WES2[j])*V_OUT[j];
    END_FOR;
    OUTPUTHB:= OUTPUTHB+WES2B;
    OUTPUTHB := TAN(OUTPUTHB);

    (*Обратная нормализация*)
    delta := (1-0)/(MAX_TAR-MIN_TAR);
    OUTPUTHB:= ( OUTPUTHB - 0 + delta*MIN_TAR)/delta;

    (*Сравнение на реальность значений и замена на 0 и 150 крайних *)
    IF OUTPUTHB<0 THEN OUTPUTHB:=0;
        ELSE
            IF OUTPUTHB >150 THEN OUTPUTHB:=150;
        END_IF;
    END_IF;

    OUT:=OUTPUTHB;
    DAV:=DAVLENIE;

END_FUNCTION_BLOCK

(* @NESTEDCOMMENTS := 'Yes' *)
(* @PATH := '\Функции' *)
(* @OBJECTFLAGS := '0, 8' *)
(* @SYMFILEFLAGS := '2048' *)
FUNCTION WRITE_OUT : BOOL

```

```

VAR_INPUT
    Command:WORD;
    (*Delay:DWORD;*)
END_VAR
VAR
END_VAR
(* @END_DECLARATION := '0' *)
    (*ВЫХОДЫ ПЛК100*)
    Out1:=Command.0;
    Out2:=Command.1;
    Out3:=Command.2;
    Out4:=Command.3;
    Out5:=Command.4;
    Out6:=Command.5;
    (*ВЫХОДЫ МБУ8*)
    Out7:=SEL(Command.6,0,1000);
    Out8:=SEL(Command.7,0,1000);
    Out9:=SEL(Command.8,0,1000);
    Out10:=SEL(Command.9,0,1000);
    Out11:=SEL(Command.10,0,1000);
    Out12:=SEL(Command.11,0,1000);
    Monitor3_Write:=Command;
    (*Prog9_32_Write:=Delay;*)
    (*Prog5_Bool_Write:=Command;
    Prog6_32_Write:=Delay;*)
END_FUNCTION

(* @NESTEDCOMMENTS := 'Yes' *)
(* @PATH := " *)
(* @OBJECTFLAGS := '0, 8' *)
(* @SYMFILEFLAGS := '2048' *)
PROGRAM ON_START
VAR
END_VAR
(* @END_DECLARATION := '0' *)
(*Инициализация Выходов нулями*)
WRITE_OUT(2#000000000000000000);
Monitor8_N_Write:=1;
Command2.Command:=0;
Command2.Delay:=0;

END_PROGRAM

(* @NESTEDCOMMENTS := 'Yes' *)
(* @PATH := " *)
(* @OBJECTFLAGS := '0, 8' *)
(* @SYMFILEFLAGS := '2048' *)
PROGRAM ON_STOP
VAR
END_VAR
(* @END_DECLARATION := '0' *)

```

```

WRITE_OUT(2#000000000000000000);
Monitor8_N_Write:=1;
Command2.Command:=0;
Command2.Delay:=0;
END_PROGRAM

```

```
(* @NESTEDCOMMENTS := 'Yes' *)
```

```
(* @PATH := " *)
```

```
(* @OBJECTFLAGS := '0, 8' *)
```

```
(* @SYMFILEFLAGS := '2048' *)
```

```
PROGRAM PLC_PRG
```

```
VAR
```

```
    Timer1: TON;          (*Таймер задержки между кадрами*)
```

```
    Timer2: TON;          (*Таймер задержки процедуры записи*)
```

```
    Prev: BOOL;           (*Нажатие "<<Преведущий" в окне WINDOW*)
```

```
    Next: BOOL;           (*Нажатие "Следующий>>" в окне WINDOW*)
```

```
    State: INT :=0;        (*Переменная текущего состояния*)
```

```
    PrevTRIG: R_TRIG;      (*Тригер нажатия кнопки "<<" на пульте*)
```

```
    NextTRIG: R_TRIG;      (*Тригер нажатия кнопки ">>" на пульте*)
```

```
    EntrTRIG: R_TRIG;      (*Тригер нажатия кнопки "ENT" на пульте*)
```

```
    BoolTrig1: R_TRIG;      (*Тригер нажатия кнопок "0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,+/-,CLR" на пульте в
положение "1"*)
```

```
    BoolTrig2: F_TRIG;      (*Тригер нажатия кнопок "0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,+/-,CLR" на пульте в
положение "0"*)
```

```
    CommTRIG1: R_TRIG;      (*Тригер нажатия кнопок "ПУСК/СТОП" на пульте в
положение "ПУСК"*)
```

```
    CommTRIG2: F_TRIG;      (*Тригер нажатия кнопок "ПУСК/СТОП" на пульте в
положение "СТОП"*)
```

```
    ReadTRIG: R_TRIG;      (*Тригер нажатия кнопки "SET" на пульте на экране 6
"Считать"*)
```

```
    SaveTRIG: R_TRIG;      (*Тригер нажатия кнопки "ENT" на пульте на экране 6
"Записать"*)
```

```
    TRIG1: R_TRIG;          (*Тригер нажатия кнопки "1" на пульте на экране 6
"Programm1"*)
```

```
    TRIG2: R_TRIG;          (*Тригер нажатия кнопки "2" на пульте на экране 6
"Programm2"*)
```

```
    TRIG3: R_TRIG;          (*Тригер нажатия кнопки "3" на пульте на экране 6
"Programm3"*)
```

```
    j: INT :=1;             (*Переменная счетчик при работе с массивом Command1*)
```

```
    PAGE: BYTE:=1;          (*Переменная хранит состояние активной страницы "F1-1,
F2-2, F3-4, F4-8, F5-16, F6-32"*)
```

```
    TEST: BOOL:=FALSE;      (*Переменная для обработки аварии "Температура
контроллера превышена"*)
```

```
    YES_NO: BOOL:=FALSE;    (*Переменная включает режим бесконечный цикл для
циклограммы*)
```

```
    Nom: INT;               (*Задаст номер ячейки памяти для хранения циклограмм
1,2,3*)
```

```
    Funk: INT;              (*Задаст номер функции "Стереть Все", "Считать",
"Записать"*)
```

(*Максимальные значения переменных нейронной сети*)

MAX_CU: REAL:=5.33;
 MAX_MG: REAL:=4.11;
 MAX_ZN: REAL:=4.57;
 MAX_Primesy: REAL:=1.2474;

(*Минимальные значения нейронной сети*)

MIN_CU: REAL:=1.02;
 MIN_MG: REAL:=0.878;
 MIN_ZN: REAL:=0.0237;
 MIN_Primesy: REAL:=0.59;

(*Переменные для состава и процента примесей*)

CU: REAL:= 2;
 MG: REAL:=2;
 ZN: REAL:=2;
 Primesy: REAL:=1;
 DAV: INT:=100;

NET1: NEURAL_NET1;

OUTPUHNB: REAL;

DAVLENIE: REAL;

Net: INT :=0; (*Переменная Включения расчета НС*)

OUTHNB1: REAL :=0;

OUTHNB2: REAL :=0;

OUTHNB3: REAL :=0;

CR: REAL;

KVAR:REAL;

PRTV: REAL; (* Предел прочности для алюминиевых сплавов в МПа*)

END_VAR

(* @END_DECLARATION := '0' *)

OUT14:=BOOL_TO_INT(TEST)*1000; (*Включить охлаждение если сработала авария по температуре контроллера*)

(*Обработка нажатия кнопок кнопочного пульта "СТАРТ/СТОП"*)

IF START THEN State:=1; END_IF;

IF STOP OR A_STOP THEN State:=4; END_IF;

(*Обработка нажатия кнопки "ENT" на 6 экране "Работа" пульта ИП320 "СТАРТ/СТОП"*)

CommTRIG1(CLK:=State2_Read.0);

CommTRIG2(CLK:=State2_Read.0);

IF CommTrig1.Q THEN State:=1; END_IF;

IF CommTrig2.Q THEN State:=4; END_IF;

(*Основная рабочая процедура выполнения циклограммы*)

CASE State OF

(*0: WRITE_OUT(CommandN);*)

1: (*Выполняется при старте циклограммы один раз*)

```

        Monitor8_N_Write:=1;                                (*Начать
выполнение циклограммы с первого кадра*)
        State2_Write:=1;                                    (*Записать в
пульт состояние кнопки СТАРТ/СТОП*)
        State:=2;                                           (*Перейти
к выполнению циклограммы*)
2:      (*Выполнение очередного кадра циклограммы*)
        WRITE_OUT(Command1[Monitor8_N_Write].Command);
        Timer1(IN:=TRUE, PT:=DWORD_TO_TIME(Command1[Monitor8_N_Write].Delay));
(*Установить в таймер задержку*)
        State:=3;
3:      (*Выполнение межкадровых функций*)
        Timer1;
        (*Вызов таймера чтобы тикал*)
        IF Timer1.Q THEN (*Если таймер тикнул*)
            IF Monitor8_N_Write<50 THEN (*Проверить не вышли ли за пределы
циклограммы 100 кадров*)
                Monitor8_N_Write:=Monitor8_N_Write+1;      (*Переключить на следующий
кадр*)
                Timer1(IN:=FALSE); (*Таймер тикнул => выключить таймер*)
                State:=2; (*Перейти к выполнению следующего кадра*)
            ELSE (*Иначе*)
                State:=SEL(YES_NO, 4, 1); (*Достигли предела циклограммы начать
сначала или закончить*)
                Timer1(IN:=FALSE);
            END_IF;
        ELSE (*Если таймер не тикнул*)
            Monitor9_32_Write:=TIME_TO_DWORD(Timer1.ET); (*Записать в пульт
время с начала установки задержки*)
        END_IF;
4:      (*Выполняется при стопе циклограммы один раз*)
        WRITE_OUT(2#0000000000000000); (*Обнулить входы*)
        State2_Write:=0; (*Записать в пульт состояние кнопки
СТАРТ/СТОП*)
        Monitor8_N_Write:=1; (*Переключится на первый кадр*)
        Monitor9_32_Write:=0; (*Записать в пульт время "0"*)
        State:=0; (*Выход из выполнения циклограммы*)
    ELSE
        WRITE_OUT(CommandN);
        IF Dysplay1_Read=4 THEN
            (*Если включен 4 экран пульта "Программа"*)
            (*Если изменения в визуализации, изменить программу в пульте*)
            IF Command2.Delay<>Command1[Prog4_N_Write].Delay THEN
                Command2:=Command1[Prog4_N_Write];
                (*State:=5;*) i:=1;
            END_IF;
            (*Если изменилась программа в пульте изменить в визуализации*)
            BoolTrig1(CLK:=(Prog5_Bool_Read.0 XOR Prog5_Bool_Read.1 XOR
                Prog5_Bool_Read.2 XOR Prog5_Bool_Read.3 XOR
                Prog5_Bool_Read.4 XOR Prog5_Bool_Read.5 XOR
                Prog5_Bool_Read.6 XOR Prog5_Bool_Read.7 XOR

```

```

Prog5_Bool_Read.8 XOR Prog5_Bool_Read.9 XOR
Prog5_Bool_Read.10 XOR Prog5_Bool_Read.11));

```

```

BoolTrig2(CLK:=(Prog5_Bool_Read.0 XOR Prog5_Bool_Read.1 XOR
Prog5_Bool_Read.2 XOR Prog5_Bool_Read.3 XOR
Prog5_Bool_Read.4 XOR Prog5_Bool_Read.5 XOR
Prog5_Bool_Read.6 XOR Prog5_Bool_Read.7 XOR
Prog5_Bool_Read.8 XOR Prog5_Bool_Read.9 XOR
Prog5_Bool_Read.10 XOR Prog5_Bool_Read.11));

```

(*Обработчики нажатия кнопок "<<", ">>" и "ENT" в пульте*)

```

PrevTRIG(CLK:=(State2_Read.1 OR Prev));

```

```

NextTRIG(CLK:=(State2_Read.2 OR Next));

```

```

EntrTRIG(CLK:=(State2_Read.3));

```

```

IF BoolTrig1.Q OR BoolTrig2.Q THEN
    Command1[Prog4_N_Write].Command:=Prog5_Bool_Read;
END_IF;

```

```

IF PrevTRIG.Q THEN
    Prog4_N_Write:=Prog4_N_Write-1;
    i:=1;
    IF Prog4_N_Write<1 THEN Prog4_N_Write:=1; END_IF;
END_IF;

```

```

IF NextTRIG.Q THEN
    Prog4_N_Write:=Prog4_N_Write+1;
    i:=1;
    IF Prog4_N_Write>100 THEN Prog4_N_Write:=50; END_IF;
END_IF;

```

```

IF EntrTRIG.Q THEN
    Command1[Prog4_N_Write].Delay:=Prog6_32_Read;
    Prog4_N_Write:=Prog4_N_Write+1;
    i:=1;
END_IF;

```

```

END_IF;

```

(*Обработка команд "Считать", "Записать" циклограмму с 6-го экрана в пульте ИП320*)

```

IF Dysplay1_Read=6 THEN

```

```

    TRIG1(CLK:=State2_Read.4);      (*Обработчик нажатия кнопки "1"*)

```

```

    TRIG2(CLK:=State2_Read.5);      (*Обработчик нажатия кнопки "1"*)

```

```

    TRIG3(CLK:=State2_Read.6);      (*Обработчик нажатия кнопки "1"*)

```

```

    IF TRIG1.Q THEN State2_Write:=16; Nom:=1; END_IF; (*Если кнопка "1" "2" и
"3" должны быть "FALSE"*)

```

```

    IF TRIG2.Q THEN State2_Write:=32; Nom:=2; END_IF; (*Если кнопка "2" "1" и
"3" должны быть "FALSE"*)

```

```

    IF TRIG3.Q THEN State2_Write:=64; Nom:=3; END_IF; (*Если кнопка "3" "1" и
"2" должны быть "FALSE"*)

```



```

ReadTRIG(CLK:=State2_Read.7); (*Обработчик нажатия кнопки "SET"*)
SaveTRIG(CLK:=State2_Read.8); (*Обработчик нажатия кнопки "ENT"*)
IF ReadTRIG.Q THEN
    Funk:=2; (*Установить номер функции*)
    i:=5;
END_IF;
IF SaveTRIG.Q THEN
    Funk:=3; (*Установить номер функции*)
    i:=5;
END_IF;
ELSE ;
END_IF;

CASE i OF
1: (*Разрешить запись/Запретить чтение*)
    READ:=254;
    WRITE:=255;
    i:=2;
2: (*Запись в пульт параметров программы из визуализации*)
    Prog5_Bool_Write:=Command1[Prog4_N_Write].Command;
    Prog6_32_Write:=Command1[Prog4_N_Write].Delay;
    Timer2(IN:=TRUE, PT:=t#200ms);
    Beep:=TRUE;
    i:=3;
3: (*Задержка на время записи в пульт*)
    Timer2;
    IF Timer2.Q THEN i:=4; END_IF;
4: (*Разрешить чтение/Запретить запись*)
    READ:=255;
    WRITE:=254;
    Timer2(IN:=FALSE);
    Beep:=FALSE;
    i:=0;
5: (*Стереть всю программу*)
    Beep:=TRUE; (*Включить звуковое сопровождение*)
    IF j<=50 THEN
        CASE Funk OF
        1:(*Функция 1 "Стереть программу"*)
            Command1[j].Command:=0;
            Command1[j].Delay:=0;
        2:(*Функция 2 "Считать программу"*)
            CASE Nom OF
            1: Command1[j]:=Save1[j];
            2: Command1[j]:=Save2[j];
            3: Command1[j]:=Save3[j];
            ELSE ;
            END_CASE;
        3:(*Функция 3 "Записать программу"*)
            CASE Nom OF

```

```

1:      Save1[j]:=Command1[j];
2:      Save2[j]:=Command1[j];
3:      Save3[j]:=Command1[j];
      ELSE ;
      END_CASE;
      ELSE ;
      END_CASE;
      j:=j+1;
ELSE
      j:=1;
      i:=0;
      Beep:=FALSE;      (*Выключить звуковое сопровождение*)
END_IF;

      ELSE
      i:=0;
      END_CASE;
END_CASE;

CASE Net OF
1: NET1(CU:=CU,  MG:=MG ,  ZN:=ZN , DAVLENIE:=DAV, Primesy:= Primesy,
OUT=>OUTPUTHB, DAV=>DAVLENIE);
OUTHB3:=OUTHB2;
OUTHB2:=OUTHB1;
OUTHB1:=OUTPUTHB;
CR:= (OUTHB1+OUTHB2+OUTHB3)/3;
KVAR:=((SQRT(((OUTHB1-CR)*(OUTHB1-CR)+(OUTHB3-CR)*(OUTHB3-CR)+(OUTHB3-
CR)*(OUTHB3-CR))/3))/CR);
IF KVAR >33 THEN OUTPUTHB:=CR; END_IF;
PRTV:=3.62*OUTPUTHB; (* Предел прочности для алюминиевых сплавов в МПа*)
Net:=0;
END_CASE;

END_PROGRAM

(* @NESTEDCOMMENTS := 'Yes' *)
(* @PATH := " *)
(* @OBJECTFLAGS := '0, 8' *)
TYPE CommandString :
STRUCT
      Command: WORD;
      Delay: DWORD;
END_STRUCT
END_TYPE
(* @END_DECLARATION := '0' *)

(* @NESTEDCOMMENTS := 'Yes' *)
(* @PATH := " *)
(* @OBJECTFLAGS := '0, 8' *)
TYPE ProgrammList :
STRUCT

```

```

    ProgName: STRING;
    Comments: STRING;
END_STRUCT
END_TYPE
(* @END_DECLARATION := '0' *)
(* @PATH := " *)

(* @NESTEDCOMMENTS := 'Yes' *)
(* @GLOBAL_VARIABLE_LIST := 'Global_Variables' *)
(* @PATH := " *)
(* @OBJECTFLAGS := '0, 8' *)
(* @SYMFILEFLAGS := '2048' *)
VAR_GLOBAL

    (*ПЛК100 - Входы*)
    In1 AT %IX0.0.0:BOOL;
    In2 AT %IX0.0.1:BOOL;
    In3 AT %IX0.0.2:BOOL;
    In4 AT %IX0.0.3:BOOL;
    In5 AT %IX0.0.4:BOOL;
    In6 AT %IX0.0.5:BOOL;
    In7 AT %IX0.0.6:BOOL;
    In8 AT %IX0.0.7:BOOL;
    (*ПЛК100 - Выходы*)
    Out1 AT %QX1.0:BOOL; (*Плундер 1 вперед*)
    Out2 AT %QX2.0:BOOL; (*Плунжер 1 назад*)
    Out3 AT %QX3.0:BOOL; (*Плунжер 2 вперед*)
    Out4 AT %QX4.0:BOOL; (*Плунжер 2 назад*)
    Out5 AT %QX5.0:BOOL; (*Плита вперед*)
    Out6 AT %QX6.0:BOOL; (*Плита назад*)
    Beer AT %QX7.0:BOOL; (*Авария*)
    (*МБУ8 - Выходы*)
    Out7 AT %QW8.1.0.0:WORD; (*Мультипликатор вперед*)
    Out8 AT %QW8.1.1.0:WORD; (*Мультипликатор назад*)
    Out9 AT %QW8.1.2.0:WORD; (*Клапан открыт*)
    Out10 AT %QW8.1.3.0:WORD; (*Клапан закрыт*)
    Out11 AT %QW8.1.4.0:WORD; (*Насос 1*)
    Out12 AT %QW8.1.5.0:WORD; (*Насос 2*)
    Out13 AT %QW8.1.6.0:WORD;
    Out14 AT %QW8.1.7.0:WORD;

    Prog4_N_Write AT %QW9.1.2.0:WORD :=1;

    (*Регистр текущего номера экрана*)
    (*Dysplay0_Read :WORD;
    Dysplay1_Read :WORD :=1;
    State2_Read : WORD;
    Monitor3_Write :WORD;
    Prog4_N_Read :WORD;
    Prog5_Bool_Read :WORD;
    Prog6_32_Read :DWORD;*)

```

```

(*Регистры Автоматическое переключение экрана*)
  (*Dysplay0_Read AT %IW9.1.0.0:WORD;
  Dysplay0_Read_Start AT %QB9.1.0.1:BYTE;
  Dysplay0_Write AT %QW9.1.1.0:WORD;
  Dysplay0_Write_Start AT %QB9.1.1.1:BYTE;
  (*Регистр текущего номера экрана*)
  Dysplay1_Read AT %IW9.2.0.0:WORD;
  (*Регистры состояния ИП320*)
  State2_Read AT %IW9.1.2.0: WORD;
  State2_Read_Start AT %QB9.1.2.1:BYTE;
  State2_Write AT %QW9.1.3.0: WORD;
  State2_Write_Start AT %QB9.1.3.1:BYTE;
  (*Регистры мониторинга работы программы*)
  Monitor3_Write AT %QW9.1.4.0:WORD;
  Monitor3_Write_Start AT %QB9.1.4.1:BYTE;
  (*Регистры ввода программного цикла*)
  Prog4_N_Read AT %IW9.1.5.0:WORD;
  Prog4_N_Read_Start AT %QB9.1.5.1:BYTE;

  Prog4_N_Write AT %QW9.1.6.0:WORD;
  Prog4_N_Write_Start AT %QB9.1.6.1:BYTE;

  Prog5_Bool_Read AT %IW9.1.7.0:WORD;
  Prog5_Bool_Read_Start AT %QB9.1.7.1:BYTE;

  Prog5_Bool_Write AT %QW9.1.8.0:WORD;
  Prog5_Bool_Write_Start AT %QB9.1.8.1:BYTE;

  Prog6_32_Read AT %ID9.1.9.0:DWORD;
  Prog6_32_Read_Start AT %QB9.1.9.1:BYTE;

  Prog6_32_Write AT %QD9.1.10.0:DWORD;
  Prog6_32_Write_Start AT %QB9.1.10.1:BYTE;*)

  (*Dysplay1.0 :BOOL; (*ПЛ1+*)
    Dysplay1.1 :BOOL; (*ПЛ1-*)
    Dysplay1.2 :BOOL; (*ПЛ2+*)
    Dysplay1.3 :BOOL; (*ПЛ2-*)
    Dysplay1.4 :BOOL; (*П+*)
    Dysplay1.5 :BOOL; (*П-*)
    Dysplay1.6 :BOOL; (*М+*)
    Dysplay1.7 :BOOL; (*М-*)
    Dysplay1.8 :BOOL; (*К+*)
    Dysplay1.9 :BOOL; (*К-*)
    Dysplay1.10 :BOOL; (*H1*)
    Dysplay1.11 :BOOL; (*H2*)
    Dysplay1.12 :BOOL; (*Резерв*)
    Dysplay1.13 :BOOL; (*Резерв*)
    Dysplay1.14 :BOOL; (*Резерв*)
    Dysplay1.15 :BOOL; (*Резерв*)*)

```

```
(*Cadr_Bool_Write AT%QW9.1.2.0: WORD;
Cadr_Bool_Write_Start AT%QB9.1.2.1: BYTE;*)
```

```
(*Ind1 AT %QX9.1.0.0.0:BOOL; (*П11+*)
Ind2 AT %QX9.1.0.0.1:BOOL; (*П11-*)
Ind3 AT %QX9.1.0.0.2:BOOL; (*П12+*)
Ind4 AT %QX9.1.0.0.3:BOOL; (*П12-*)
Ind5 AT %QX9.1.0.0.4:BOOL; (*П+*)
Ind6 AT %QX9.1.0.0.5:BOOL; (*П-*)
Ind7 AT %QX9.1.0.0.6:BOOL; (*M+*)
Ind8 AT %QX9.1.0.0.7:BOOL; (*M-*)
Ind9 AT %QX9.1.1.0.0:BOOL; (*K+*)
Ind10 AT %QX9.1.1.0.1:BOOL;(*K-*)
Ind11 AT %QX9.1.1.0.2:BOOL;(*H1*)
Ind12 AT %QX9.1.1.0.3:BOOL;(*H2*)*)
```

```
i: INT :=1;
```

```
Command1:ARRAY[1..50] OF CommandString;
Command2:CommandString;
```

```
(*Cycle_time AT %IW10.0:WORD;
Time_Power_Down AT %IW10.1:WORD;
Temp_inside_PLC AT %ID10.2:REAL;
Power_Satus AT %IX10.3:BOOL;
CPU_Overload AT %IX10.4:BOOL;
Free_Processor AT %IW10.5:WORD;*)
```

```
END_VAR
```

```
VAR_GLOBAL RETAIN PERSISTENT
```

```
ProgrammList: ARRAY[1..3] OF ProgrammList:=(ProgName:='Programm1'),
```

```
(ProgName:='Programm2'),
```

```
(ProgName:='Programm3');
```

```
Save1:ARRAY[1..50] OF CommandString; (*Для хранения программы при
выключенном питании*)
```

```
Save2:ARRAY[1..50] OF CommandString; (*Для хранения программы при
выключенном питании*)
```

```
Save3:ARRAY[1..50] OF CommandString; (*Для хранения программы при
выключенном питании*)
```

```
END_VAR
```

```
(* @OBJECT_END := 'Global_Variables' *)
```

```
(* @CONNECTIONS := Global_Variables
```

```
FILENAME : "
```

```
FILETIME : 0
```

```
EXPORT : 0
```

```
NUMOFCONNECTIONS : 0
```

```
*)
```

```
(* @NESTEDCOMMENTS := 'Yes' *)
(* @GLOBAL_VARIABLE_LIST := 'Net' *)
(* @PATH := " *)
(* @OBJECTFLAGS := '0, 8' *)
(* @SYMFILEFLAGS := '2048' *)
VAR_GLOBAL
    CommandN:WORD;
END_VAR
```

```
(* @OBJECT_END := 'Net' *)
(* @CONNECTIONS := Net
FILENAME : 'C:\Project\Net.exp'
FILETIME : 1406441058
EXPORT : 0
NUMOFCONNECTIONS : 1
CONNECTIONSETTINGS : 0,1,1,1,0,1,20,50,0,0,0,0,0,1,1202,4294967295
NETWORKNAME : 'UDP',"
*)
```

```
(* @NESTEDCOMMENTS := 'Yes' *)
(* @GLOBAL_VARIABLE_LIST := 'Variable_Configuration' *)
(* @PATH := " *)
(* @OBJECTFLAGS := '0, 8' *)
(* @SYMFILEFLAGS := '2048' *)
VAR_CONFIG
END_VAR
```

```
(* @OBJECT_END := 'Variable_Configuration' *)
(* @CONNECTIONS := Variable_Configuration
FILENAME : "
FILETIME : 0
EXPORT : 0
NUMOFCONNECTIONS : 0
*)
```

```
PLC_CONFIGURATION
_GLOBAL
_VERSION: 3
_AUTOADR: 1
_CHECKADR: 1
_SAVECONFIGFILESINPROJECT: 0
_END_GLOBAL
```

```
_MODULE: '3S'
_SECTION_NAME: '__not_found__'
_INDEX_IN_PARENT: '-1'
_MODULE_NAME: '__not_found__'
_NODE_ID: 0
_IECIN: %IB0
_IECOUT: %QB0
```

```

_IECDIAG: %MB0
_DOWNLOAD: 1
_EXCLUDEFROMAUTOADR: 0
_COMMENT: "
_END_MODULE
PLC_END

```

```

RESOURCE
END_RESOURCE

```

```

_ALARMCONFIG
_ALARMCONFIGNEXTTEXTID : 10018
_ALARMCONFIGFORMATS : 'HH$':$'mm$':$'ss','dd$'-$'MM$'-$'yyyy'
_ALARMCLASSLIST : 3
_ALARMCLASSID : 0
_ALARMCLASSACKTYPE : 2
_ALARMCLASSNAME : 'SYSTEM'
_ALARMCLASSDESCRIPTION : 'Системные аварии'
_ALARMCLASSBGCOLORS : 16777215,16777215,16777215
_ALARMCLASSTEXTCOLORS : 3394560,255,16711680
_ALARMCLASSBITMAPS : ','WARNING.BMP','WARNING1.BMP'
_ALARMACTIONLIST : 0
(* @ALARMCLASSRESETCOLORS := '_ALARMCLASSRESETCOLORS: 33023,16777215' *)
(* @ALARMCLASSRESETBITMAP := '_ALARMCLASSRESETBITMAP: $$' *)
_ALARMCLASSID : 1
_ALARMCLASSACKTYPE : 2
_ALARMCLASSNAME : 'TEMPERATURA'
_ALARMCLASSDESCRIPTION : 'Повышение температуры'
_ALARMCLASSBGCOLORS : 16777215,16777215,16777215
_ALARMCLASSTEXTCOLORS : 3394560,255,16711680
_ALARMCLASSBITMAPS : ','WARNING2.BMP','WARNING1.BMP'
_ALARMACTIONLIST : 1
_ALARMACTION : 4
_ALARMACTIONEVENTFLAGS : 15
_ALARMACTIONTEXTID : 10016
_ALARMACTIONMESSAGE : 'MESSAGE'
_ALARMACTIONVARIABLETYPE : 0
_ALARMACTIONVARIABLE : 'PLC_PRG.TEST'
(* @ALARMCLASSRESETCOLORS := '_ALARMCLASSRESETCOLORS: 33023,16777215' *)
(* @ALARMCLASSRESETBITMAP := '_ALARMCLASSRESETBITMAP: $$' *)
_ALARMCLASSID : 2
_ALARMCLASSACKTYPE : 2
_ALARMCLASSNAME : 'WORK'
_ALARMCLASSDESCRIPTION : 'Рабочие моменты'
_ALARMCLASSBGCOLORS : 16777215,16777215,16777215
_ALARMCLASSTEXTCOLORS : 3394560,255,16711680
_ALARMCLASSBITMAPS : ','WARNING3.BMP','WARNING1.BMP'
_ALARMACTIONLIST : 0
(* @ALARMCLASSRESETCOLORS := '_ALARMCLASSRESETCOLORS: 33023,16777215' *)
(* @ALARMCLASSRESETBITMAP := '_ALARMCLASSRESETBITMAP: $$' *)
_ALARMGROUPLISTNAME : 'Система'

```

```

_ALARMGROUPPATH : 'Система'
_ALARMGROUPLIST : 1
_ALARMGROUPNAME : 'Узел сигнализации'
_ALARMGROUPPATH : 'Система/Узел сигнализации'
_ALARMGROUPDESC : "
_ALARMGROUPDEACT : "
_ALARMLIST : 6
_ALARMID : 0
_ALARMIDOFCLASS : 0
_ALARMPRIORITY : 0
_ALARMTYPE : 0
_ALARMMESSAGE : 'Питание выключено'
_ALARMTEXTID : 10003
_ALARMEXPRESSIONS : 'POWER_STATUS',' ',' ',' '
_ALARMID : 2
_ALARMIDOFCLASS : 0
_ALARMPRIORITY : 0
_ALARMTYPE : 1
_ALARMMESSAGE : 'Загрузка процессора более 80%'
_ALARMTEXTID : 10007
_ALARMEXPRESSIONS : 'CPU_OVERLOAD',' ',' ',' '
_ALARMID : 3
_ALARMIDOFCLASS : 1
_ALARMPRIORITY : 0
_ALARMTYPE : 4
_ALARMMESSAGE : 'Температура контроллера повышена'
_ALARMTEXTID : 10008
_ALARMEXPRESSIONS : 'TEMP_INSIDE','27',' ','3',' '
_ALARMID : 4
_ALARMIDOFCLASS : 2
_ALARMPRIORITY : 0
_ALARMTYPE : 1
_ALARMMESSAGE : 'Нажата кнопка ПУСК'
_ALARMTEXTID : 10009
_ALARMEXPRESSIONS : 'In1',' ',' ',' '
_ALARMID : 5
_ALARMIDOFCLASS : 2
_ALARMPRIORITY : 0
_ALARMTYPE : 0
_ALARMMESSAGE : 'Нажата кнопка СТОП'
_ALARMTEXTID : 10010
_ALARMEXPRESSIONS : 'In2',' ',' ',' '
_ALARMID : 6
_ALARMIDOFCLASS : 0
_ALARMPRIORITY : 0
_ALARMTYPE : 0
_ALARMMESSAGE : 'Нажата кнопка АВАРИЙНЫЙ ОСТАНОВ'
_ALARMTEXTID : 10011
_ALARMEXPRESSIONS : 'In4',' ',' ',' '
_DATABASETYPE : 'filesystem'
_DATABASENAME : "

```



```

_DATABASEPATHS : 'c:\users\вадим\desktop\университет\проект\'Alarms'
_DATABASEVARIABLE : "
_DATABASEFILEHANDLING : 0,0
_VISUALSETTINGSFLAGS : 0,0,0,0
_VISUALSETTINGSFLAGS : ","
_VISUALSETTINGSODYNTEXTFILECOUNT : 0

(* @ALARMCONFIGFLAGS := '_ALARMCONFIGFLAGS: 4' *)
(* @ALARMCONFIGGLOBALDB_STR := '_ALARMCONFIGGLOBALDB_STRINGS:
$', '$c:\users\вадим\desktop\университет\проект\'$, '$Alarm$', '$$' *)
(* @ALARMCONFIGGLOBALDB_NUM := '_ALARMCONFIGGLOBALDB_NUMBERS: 1,2'
*)
_END_ALARMCONFIG

```

ПЛК-2

```

(* @NESTEDCOMMENTS := 'Yes' *)
(* @PATH := " *)
(* @OBJECTFLAGS := '0, 8' *)
(* @SYMFILEFLAGS := '2048' *)
PROGRAM PLC_PRG
VAR
END_VAR
(* @END_DECLARATION := '0' *)
CASE Dysplay1_Read OF
18: (* IF State7_Read.3 THEN State7_Write:=16; END_IF; (*Если кнопка "1" "2" и "3" должны
быть "FALSE"*)*)
CASE State7_Read OF
5 : CommandN:=3073;
6 : CommandN:=3074;
9 : CommandN:=3080;
10: CommandN:=3076;
ELSE CommandN:=0;
END_CASE;
19: CASE State7_Read AND 2#11110011 OF
1 : CommandN:=3360;
2 : CommandN:=3632;
ELSE CommandN:=0;
END_CASE;
20: CASE State7_Read AND 2#11110011 OF
1 : CommandN:=3200;
2 : CommandN:=3136;
ELSE CommandN:=0;
END_CASE;
ELSE CommandN:=0;
END_CASE;

P1_Error_W:=SEL(P1_Error=61440, P1_Error AND INT_TO_WORD(15) - 4, 1);
P1_Time_W:=P1_Time;
P1_Data_W:=P1_Data;
P1_Data1_W:=REAL_TO_WORD(P1_Data);

```

```
P2_Error_W:=SEL(P2_Error=61440, P1_Error AND INT_TO_WORD(15) - 4, 1);
P2_Time_W:=P2_Time;
P2_Data_W:=P2_Data;
P2_Data1_W:=REAL_TO_WORD(P2_Data);
```

```
Pl_Error_W:=SEL(Pl_Error=61440, Pl_Error AND INT_TO_WORD(15) - 4, 1);
Pl_Time_W:=Pl_Time;
Pl_Data_W:=Pl_Data;
Pl_Data1_W:=REAL_TO_WORD(Pl_Data);
```

```
M_Error_W:=SEL(M_Error=61440, M_Error AND INT_TO_WORD(15) - 4, 1);
M_Time_W:=M_Time;
M_Data_W:=M_Data;
M_Data1_W:=REAL_TO_WORD(M_Data);
```

```
D_Error_W:=SEL(D_Error=61440, M_Error AND INT_TO_WORD(15) - 4, 1);
D_Time_W:=D_Time;
D_Data_W:=D_Data;
D_Data1_W:=REAL_TO_WORD(D_Data);
```

```
T_Error_W:=SEL(T_Error=61440, M_Error AND INT_TO_WORD(15) - 4, 1);
T_Time_W:=T_Time;
T_Data_W:=T_Data;
T_Data1_W:=REAL_TO_WORD(T_Data);
END_PROGRAM
```

```
(* @NESTEDCOMMENTS := 'Yes' *)
(* @GLOBAL_VARIABLE_LIST := 'Global_Variables' *)
(* @PATH := " *)
(* @OBJECTFLAGS := '0, 8' *)
(* @SYMFILEFLAGS := '2048' *)
VAR_GLOBAL
END_VAR
```

```
(* @OBJECT_END := 'Global_Variables' *)
(* @CONNECTIONS := Global_Variables
FILENAME : "
FILETIME : 0
EXPORT : 0
NUMOFCONNECTIONS : 0
*)
```

```
(* @NESTEDCOMMENTS := 'Yes' *)
(* @GLOBAL_VARIABLE_LIST := 'Net' *)
(* @PATH := " *)
(* @OBJECTFLAGS := '0, 8' *)
(* @SYMFILEFLAGS := '2048' *)
VAR_GLOBAL
    CommandN:WORD;
END_VAR
```

```

(* @OBJECT_END := 'Net' *)
(* @CONNECTIONS := Net
FILENAME : "
FILETIME : 0
EXPORT : 1
NUMOFCONNECTIONS : 1
CONNECTIONSETTINGS : 0,1,0,1,1,1,20,50,0,0,0,0,0,1,1202,4294967295
NETWORKNAME : 'UDP',"
*)

(* @NESTEDCOMMENTS := 'Yes' *)
(* @GLOBAL_VARIABLE_LIST := 'Networkmanagement implicit Variables UDP' *)
(* @PATH := " *)
(* @OBJECTFLAGS := '0, 8' *)
(* @SYMFILEFLAGS := '2048' *)
VAR_GLOBAL CONSTANT
    USE_NWVARS_UDP : BOOL := TRUE;
    MAX_NetVarItems_UDP : INT := 0;
    MAX_NetVarPDO_Rx_UDP : INT := 0;
    MAX_NetVarPDO_Tx_UDP : INT := 0;
    MAX_NetVarOD_UDP : INT := 0;
END_VAR
VAR_GLOBAL
    pNetVarItems_UDP : ARRAY[0..MAX_NetVarItems_UDP] OF
NetVarDataItem_UDP;
    pNetVarPDO_Rx_UDP : ARRAY[0..MAX_NetVarPDO_Rx_UDP] OF
NetVarPDO_Rx_UDP;
    pNetVarPDO_Tx_UDP : ARRAY[0..MAX_NetVarPDO_Tx_UDP] OF
NetVarPDO_Tx_UDP;
    pNetVarOD_UDP : ARRAY[0..MAX_NetVarOD_UDP] OF
NetVarSDO_UDP;
    pNetVarPDO_Rx_Diagnosis_UDP : ARRAY[0..MAX_NetVarPDO_Rx_UDP] OF
NetVarUDPDiagStruct;
    pNetVarPDO_Tx_Diagnosis_UDP : ARRAY[0..MAX_NetVarPDO_Tx_UDP] OF
NetVarUDPDiagStruct;
END_VAR

(* @OBJECT_END := 'Networkmanagement implicit Variables UDP' *)
(* @CONNECTIONS := Networkmanagement implicit Variables UDP
FILENAME : "
FILETIME : 0
EXPORT : 0
NUMOFCONNECTIONS : 0
*)

(* @NESTEDCOMMENTS := 'Yes' *)
(* @GLOBAL_VARIABLE_LIST := 'Variable_Configuration' *)
(* @PATH := " *)
(* @OBJECTFLAGS := '0, 8' *)
(* @SYMFILEFLAGS := '2048' *)

```

```
VAR_CONFIG
END_VAR
```

```
(* @OBJECT_END := 'Variable_Configuration' *)
(* @CONNECTIONS := Variable_Configuration
FILENAME : "
FILETIME : 0
EXPORT : 0
NUMOFCONNECTIONS : 0
*)
```

```
PLC_CONFIGURATION
_GLOBAL
_VERSION: 3
_AUTOADR: 1
_CHECKADR: 1
_SAVECONFIGFILESINPROJECT: 0
_END_GLOBAL
```

```
_MODULE: '3S'
_SECTION_NAME: '__not_found__'
_INDEX_IN_PARENT: '-1'
_MODULE_NAME: '__not_found__'
_NODE_ID: 0
_IECIN: %IB0
_IECOUT: %QB0
_IECDIAG: %MB0
_DOWNLOAD: 1
_EXCLUDEFROMAUTOADR: 0
_COMMENT: "
_END_MODULE
PLC_END
```

```
RESOURCE
```

```
END_RESOURCE
```

```
_ALARMCONFIG
_ALARMCONFIGNEXTTEXTID : 10002
_ALARMCONFIGFORMATS : 'HH$':$mm$':$ss','dd$'-$'MM$'-$'yyyy'
_ALARMCLASSLIST : 1
_ALARMCLASSID : 0
_ALARMCLASSACKTYPE : 0
_ALARMCLASSNAME : 'DEFAULT'
_ALARMCLASSDESCRIPTION : "
_ALARMCLASSBGCOLORS : 16777215,16777215,16777215
_ALARMCLASSTEXTCOLORS : 3394560,255,16711680
_ALARMCLASSBITMAPS : ",""
_ALARMACTIONLIST : 0
(* @ALARMCLASSRESETCOLORS := '_ALARMCLASSRESETCOLORS: 33023,16777215' *)
(* @ALARMCLASSRESETBITMAP := '_ALARMCLASSRESETBITMAP: $$" *)
```

```

_ALARMGROUPLISTNAME : 'Система'
_ALARMGROUPPATH : 'Система'
_ALARMGROUPLIST : 0
_VISUALSETTINGSFLAGS : 0,0,0,0
_VISUALSETTINGSFLAGS : ","
_VISUALSETTINGSODYNTEXTFILECOUNT : 0

(* @ALARMCONFIGFLAGS := '_ALARMCONFIGFLAGS: 4' *)
(* @ALARMCONFIGGLOBALDB_STR := '_ALARMCONFIGGLOBALDB_STRINGS:
$$,$$,$$,$$' *)
(* @ALARMCONFIGGLOBALDB_NUM := '_ALARMCONFIGGLOBALDB_NUMBERS: 0,0'
*)
_END_ALARMCONFIG

```

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

УТВЕРЖДАЮ
 Проректор ВлГУ
 по образовательной деятельности
 к.т.н., доцент
 А.А. Панфилов
 « » 2018 г.



АКТ

Использования в учебном процессе результатов
 кандидатской диссертации Денисова М.С. на тему
 «Автоматизация производства заготовок из высокопрочных алюминиевых
 сплавов»

Мы, нижеподписавшиеся: начальник учебно-методического управления Шеин И.П., зав. кафедрой автоматизации технологических процессов, д.т.н., профессор Коростелёв В.Ф., к.т.н., доцент, заместитель заведующего кафедрой АТП Рассказчиков Н.Г., составили настоящий акт о том, что результаты кандидатской диссертации Денисова М.С. используются в учебном процессе для студентов специальности 15.03.04 и 15.04.04, а именно:

1. В лекциях по курсам:
 - Автоматизация производственных процессов в машиностроении;
 - Автоматизация технологических процессов;
 - Основы автоматизации и управления;
2. В лабораторных работах по курсу Автоматизация технологических процессов: «Изучение устройств перемещения и позиционирования», «Изучение систем автоматического управления объектом», «Изучение цифровой системы автоматического управления реальным объектом», «Изучение процесса «сжимаемости» жидкого металла как объекта управления со скрытыми свойствами»;
3. В курсовом проектировании по дисциплинам Автоматизация технологических процессов, Основы автоматизации и управления.
4. В процессе подготовки выпускных квалификационных работ.

Начальник УМУ

Шеин И.П.

Зав. кафедрой АТП
д.т.н., профессор

Коростелёв В.Ф.

Доцент, к.т.н.

Рассказчиков Н.Г.



ПРИЛОЖЕНИЕ 3



УТВЕРЖДАЮ
Директор
ООО «АЛВЭМЗ»,
А.Н. Прохоров
2018г.

РЕКОМЕНДАЦИЯ К ВНЕДРЕНИЮ

результатов диссертационной работы Денисова М. С.
«Автоматизация производства заготовок из высокопрочных
алюминиевых сплавов».

На ООО «АЛВЭМЗ» основную номенклатуру выпускаемых деталей получают методом литья под давлением алюминиевых сплавов. Выпуск деталей осуществляется на современных машинах для литья под давлением. Кроме деталей широкого потребления, на предприятии выпускаются детали ответственного назначения, к которым предъявляются повышенные требования по точности, твердости и герметичности, а применяемые литейные алюминиевые сплавы АК9, АК12, используемые для получения таких отливок, склонны к образованию литейных дефектов: поры, рыхлоты, раковины, поэтому технологически не всегда удается получить качественную отливку. Большинство указанных дефектов можно обнаружить только в процессе испытаний или на этапе эксплуатации, что приводит к увеличению рекламаций со стороны заказчика и, как следствие, значительным финансовым затратам.

Повышение стабильно-высокого качества выпускаемых деталей ответственного назначения за счет внедрения современных средств автоматизации и контроля, позволит снизить количество выпускаемого брака.

Работа Денисов М.С. представляет практический интерес для ООО «АЛВЭМЗ» своей актуальностью, сочетанием достижения линейных размеров отливки 2-3т класса точности, с 7-8 классом шероховатости поверхности, коэффициентом использования металла 0,8-0,9, а также позволит снизить долю выпускаемого брака на 25%, и повысить производительности оборудования на 15%.

Считаем, что материалы работы могут быть внедрены на производство, в цех литья под давлением ООО «АЛВЭМЗ» при изготовлении деталей ответственного назначения с соответствующими доработками технологического процесса и модернизацией системы управления оборудованием.

Директор

Прохоров А.Н.

Главный инженер

Демидов Ю.И.

Начальник тех. отдела

Крылов М.И.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО Научно-производственный центр «ИНОР»,

к.т.н., Л.П. Хромова.

«_____» 2017 г.



АКТ

о внедрении (использовании) результатов

диссертационной работы

Денисова Максима Сергеевича

«Автоматизация производства заготовок из высокопрочных
алюминиевых сплавов».

Комиссия в составе: председатель – генеральный директор ООО НПЦ «ИНОР», к.т.н., Л.П. Хромова, члены комиссии: ведущий научный сотрудник, к.т.н., В.В.Соснин, Директор по производству М.А.Фролов, инженер по стандартизации и научно-технической информации Н.Е. Чугунова составили настоящий Акт о том, что результаты диссертационной работы Денисова М.С. «Автоматизация производства заготовок из высокопрочных алюминиевых сплавов», использованы в производственной деятельности ООО НПЦ «ИНОР» при разработке технологических процессов для изготовления изделий точного машиностроения в следующем виде для:

1. Разработки методик расчета и моделирования процессов программного наложения давления на кристаллизующийся металл в зависимости от формы и объема заготовки.
2. Создания базы экспериментальных данных по исследованию свойств конечной продукции в зависимости от режимов наложения давления.
3. Разработки технических предложений по проектированию и изготовлению технологической оснастки для автоматизированных комплексов с программным наложением давления на кристаллизующийся металл, в зависимости от формы и объема заготовки.
4. Определения состава и структуры системы управления технологическим оборудованием для программно-корректируемого наложения давления на жидкий и кристаллизующийся металл при изготовлении изделий точного машиностроения.
5. Использования технологии и управляющей программы для производства детали «Поршень ДВС» как базовой.

Использование указанных результатов позволило: 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 на 1,0 млн. руб. в 2017 году, а также стендовых и натурных испытаний на 75 млн. руб. в 2017 году, получить экономию материалов и ресурсов с повышением физико-механических и эксплуатационных свойств выпускаемых деталей и изделий общей стоимостью 4,5 млн. руб.

Результаты внедрялись при выполнении НИР и ОКР по теме: №105-ИП-16 «Разработка новых методов изостатической опрессовки расплавов при варьируемых температурно-временных режимах наложения давления для создания композиционных сплавов с особыми физико-механическими свойствами».

Председатель комиссии, к.т.н.



Л.П. Хромова

Члены комиссии:

Ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.



В.В. Соснин

Директор по производству



М.А. Фролов

Инженер по стандартизации и
научно-технической информации



Н.Е. Чугунова