

Владимирский государственный университет

**ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИЯ
И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЛИТЬЯ
С НАЛОЖЕНИЕМ ДАВЛЕНИЯ**

Москва 2004

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1. Состояние теории процессов литья, основанных на использовании вакуумирования и наложения давления ..10	
1.1. Тенденции развития специальных способов литья	10
1.2. Исследования процессов литья с использованием давления	12
1.3. Технологические особенности управляемых процессов литья с использованием давления	24
1.4. Автоматизация процессов литья под давлением	48
1.5. Управление формированием структуры отливок	53
Глава 2. Создание системы управления наложением давления на кристаллизующийся металл	62
2.1. Согласование режимов наложения давления со скоростью охлаждения	64
2.2. Основные принципы управления	67
2.3. Экспериментальный технологический комплекс	71
2.4. Аппаратная реализация системы управления прессом	76
2.5. Программная реализация системы управления	77
Глава 3. Разработка комплексного процесса и автоматизированной технологии производства деталей газотехнического назначения	79
3.1. Литье с вакуумированием и динамической опрессовкой кристаллизующегося металла как альтернатива серийной технологии	79
3.2. Управление вакуумированием и наложением давления	81
3.3. Разработка схемы процесса и проектирование технологической оснастки	94
3.4. Производство опытной партии отливок	98

Глава 4. Экспериментальные исследования и разработка технологии производства литых автомобильных дисков из алюминиевых сплавов	104
4.1. Оценка возможности замены штампованных дисков литыми.....	105
4.2. Анализ результатов исследований	113
4.3. Разработка математической модели теплового взаимодействия расплава с материалом формы	146
4.4. Технология производства автомобильных дисков из высокопрочного алюминиевого сплава АЛ246	151
Глава 5. Автоматизация проектирования процесса в концепции технологии открытых систем	161
5.1. Создание информационной среды	161
5.2. Технология открытых систем (ТОС)	164
5.3. Создание интегрированной системы проектирования, отработки технологии и программного управления	168
5.4. Автоматизированное проектирование процесса производства изделия «гильза»	172
Глава 6. Перспективы использования давления для перевода металлических расплавов в сильнонеравновесные состояния	184
6.1. Достижения и проблемы в области использования давления	184
6.2. Влияние давления на температуру начала кристаллизации	187
6.3. О формировании структуры из сильнонеравновесных состояний	191
6.4. Требования к техническому оборудованию и системам управления	192
Заключение	194
Приложение	195
Список использованных источников	209

ВВЕДЕНИЕ

Необходимо признать, что по мере развития конкурентных рыночных отношений одной из главных целей научных исследований в сфере высокотехнологичных производств становится обеспечение высокого качества выпускаемой продукции. В литейном производстве как в одной из важнейшей подотрасли заготовительного производства машиностроения качество отливок - это прежде всего отсутствие таких характерных дефектов, как усадочная пористость, рыхлота, грубая поверхность, отклонения размеров.

При всем многообразии литейных процессов принципиальным в отношении качества отливок является процесс фазового перехода, когда жидкий расплав превращается в одну или несколько фаз. В зависимости от скорости охлаждения, накладываемого давления, частоты электрических, магнитных, акустических полей и других факторов в момент фазового перехода возникает бесчисленное множество возможных сценариев формирования кристаллического строения.

К сожалению, состояние теории кристаллизации на сегодняшний день таково, что предсказать развитие процесса и тем более управлять им в нужном направлении не представляется возможным.

Теория кристаллизации расплавов в том виде, в каком она сформировалась и используется в литейном производстве, в лучшем случае может быть использована как инструмент исследования процессов, протекающих в зависимости от температуры и времени. Но даже этих двух параметров в отношении сложных многокомпонентных металлических систем недостаточно, чтобы столкнуться с таким нагромождением эмпирического материала, из которого невозможно построить сколько-нибудь стройную систему представлений. Поэтому использование дополнительных внешних факторов воздействия на процесс кристаллизации – давления, электромагнитных полей и других – конечно же привносит в существующую теорию кристаллизации новые факты, информацию, требующих осмысления, изучения, обобщения.

Возможности теории кристаллизации в значительной степени связаны с тепловой теорией литья, основы которой заложены в работах А.И. Вейника, Г.Ф. Баландина, Б.Б. Гуляева.

В то же время исследования И.И. Новикова, который впервые обратил внимание на неравновесные (реальные) состояния металлических систем и

установил качественно новые взаимосвязи между свойствами металлов и сплавов, с одной стороны, и условиями формирования кристаллического строения, с другой, как раз и подводят к тому, чтобы от созерцания диаграмм состояния и термодинамических расчетов и оценок общего направления развития процессов перейти к активному управлению сложными динамическими процессами.

Выражаясь другими словами, на данном этапе, когда общие фундаментально-теоретические основы поведения металлических систем известны, задачей теории все больше становится создание высоких наукоемких технологий модульного типа, распространение которых в промышленности наряду с традиционными проблемами качества, производительности и т.д. позволило бы в комплексе решать такие перспективные задачи, как создание виртуальных производств, защита экологии, интеграция в систему международного разделения труда.

В качестве одного из подобных модулей представлен процесс литья с наложением давления на кристаллизующийся металл, при осуществлении которого в отличие от известных процессов литья под давлением и жидкой штамповки давление накладывается изнутри, из-под корки закристаллизовавшегося металла, причем во времени изменение величины давления обрабатывается с учетом развития процесса кристаллизации, свойств сплава, конфигурации отливки, требований, предъявляемых к ней по точности, шероховатости поверхности, плотности, герметичности, прочности, пластичности и т.д.

Процесс прошел промышленную апробацию и в течение более чем десяти лет освоено серийное производство целого ряда изделий в основном из алюминиевых деформируемых термически упрочняемых сплавов типа дюралюминов Д1, Д16 и других, а также из некоторых марок латуней и бронз. Явные преимущества процесса – высокая точность, сопоставимая с 7 – 9-м квалитетами точности для механически обрабатываемых поверхностей, высокая герметичность под пневматическим и гидравлическим давлениями выше 40 МПа, прочность и пластичность, не уступающие пластически деформированному металлу – достигнуты на изделиях сравнительно несложной конфигурации, но со значительной толщиной стенки. В основном это корпуса пневмо-гидрораспределительной арматуры, детали газотехнического назначения, вкладыши для пресс-форм литья пластмасс и др.

В то же время развитие техники и необходимость освоения производства сложных изделий из сплавов с низкими технологическими свойствами

выдвигает целый ряд новых задач. Это прежде всего формирование однородной структуры, повышение производительности процесса, возможность получения изделий сложной конфигурации больших размеров с переменной толщиной стенки, включая и изделия из сплавов с высокой усадкой, склонных к образованию трещин, и т.д.

Создание основ теории процесса литья с наложением давления может быть связано с решением широкого спектра проблем, но наиболее актуально – использование их для феноменологического описания поведения кристаллизующегося металла в условиях отвода теплоты, вакуумирования и наложения давления.

Такое описание не может быть построено на сравнении отдельных фактов или анализе частных закономерностей. Необходима обширная и достоверная информация. Поэтому в направлении дальнейшего развития теории процесса в отличие от традиционных методов экспериментальных и теоретических исследований предложен новый подход, суть которого заключается в том, что изучение процесса осуществляется в составе автоматизированной системы управления. Такая система оснащена средствами сбора, обработки, хранения и представления информации об изменении тех параметров, от которых зависит качество продукции. Оригинальность здесь в том, что человек с его знаниями и опытом, находясь в контуре управления, имеет возможность, изменяя программу, активно влиять и воздействовать на ход процесса. Это позволяет вычислительные возможности системы направить на производство новых знаний о технологическом объекте.

Использование такой системы особенно эффективно при освоении производства новых изделий, когда параметров много, а их воздействие на ход процесса в силу влияния внешних возмущений и переменных факторов имеет сложный характер.

Изучение поведения кристаллизующегося металла под давлением осуществлено на целом ряде достаточно сложных изделий и заготовок. Характерно, что необходимость использования процесса литья с программным наложением давления во всех случаях была обусловлена серьезными причинами, когда ни один из серийно освоенных процессов, таких как штамповка, литье или механическая обработка из проката, не давал положительного результата. В этом смысле процесс представляется достаточно универсальным и может быть рекомендован для более широкого промышленного освоения.

Для дальнейшего развития теории процесса важное значение приобретают такие явления, как сжимаемость жидкого металла, фильтрационная пропитка междендритных пространств, усадка при переходе из жидкого в кристаллическое состояние и др. Качественные и количественные закономерности названных явлений установлены в результате обработки и систематизации большого объема данных. Показано, что относительное изменение объема при переходе из жидкого состояния в твердое достигает 10 %. Здесь теоретические расчеты хорошо согласуются с экспериментальными данными. Такие меры, как установка прибылей, направленная кристаллизация и другие не обеспечивают полной компенсации усадки. Под влиянием давления, накладываемого изнутри, легкоплавкая часть расплава проникает в пустоты между ветвями дендритов, причем относительный объем металла, запрессовываемого в кристаллический остов, может составлять 1 – 3 %.

Однако наряду с повышением плотности и герметичности, достигаемым при наложении давления за счет в основном механической опрессовки кристаллизующегося металла, значительное внимание в монографии уделено и перспективным проблемам, в частности, основам управления фазовыми превращениями и формированием более однородных и бездефектных структур из сильно неравновесных состояний. Для создания таких состояний требуются специальное оборудование, приборы, технологическое оснащение, программно-алгоритмическое обеспечение, средства автоматизированного управления, которым посвящены соответствующие главы.

В качестве теоретической основы формирования структур в условиях наложения программно-корректируемого давления использованы современные представления о строении жидких расплавов, а также основные положения теории сложных динамических систем.

Стремление охватить широкий спектр вопросов, связанных с теорией и технологией наложения давления на жидкий, кристаллизующийся и закристаллизовавшийся металл, преследует вполне определенную цель – расширить номенклатуру сплавов, особенно сплавов с низкими литейно-технологическими свойствами, исключить необходимость обработки литых заготовок методами пластического деформирования, повысить конкурентоспособность литья с наложением давления по отношению к традиционным процессам заготовительного производства.

Автор выражает искреннюю благодарность коллегам по работе, оказавшим значительное содействие в подготовке представленных в моно-

графии материалов, Н.Г. Рассказчикову, М.Е. Клименко, М.Е. Щелокову, А.Н. Кирилиной, Е.А. Мартынову, Н.Н. Гришину, А.В. Игошину и др.

Несмотря на незаконченный и во многих аспектах дискуссионный характер предложенных в книге разработок и научных положений, автор рассчитывает на доброжелательное отношение и общую положительную оценку монографии хотя бы потому, что для заинтересованных специалистов она может быть являться как отправной точкой в дальнейшем развитии теории и совершенствовании процессов литья с использованием вакуумирования и наложения давления.

Глава 1. СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ, ОСНОВАННЫХ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВАКУУМИРОВАНИЯ И НАЛОЖЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

1.1. Тенденции развития специальных способов литья

Многие из используемых в настоящее время специальных видов литья имеют многовековую историю. Например, способы литья по восковым моделям, литья в кокиль были известны в глубокой древности [1, 2]. Однако всегда литейщики использовали их для получения отливок сложной конфигурации, максимально приближающихся к готовому изделию [3]. Причиной этого было стремление повысить качество и увеличить выпуск массовой продукции, к точности которой предъявлялись повышенные требования [4].

Изготовление чугунных отливок в формах обосновывалось стремлением снизить трудоемкость изготовления формы, особенно в массовом производстве. При этом основными проблемами оказались стойкость кокилей и устранение отбела [5]. При использовании в дальнейшем кокилей для изготовления отливок из алюминиевых и магниевых сплавов вышеназванные проблемы стали не столь острыми. Более того, накопленный опыт показал, что в сравнении с песчаной формой кокиль позволяет в определенных пределах регулировать процессы охлаждения расплава при заполнении формы и затвердевании отливки. Использование облицовок и красок на рабочей поверхности формы и ее нагрев перед заливкой расплава позволяют существенно улучшить заполняемость формы расплавом.

Однако изготовление в формах тонкостенных отливок с развитой поверхностью остается проблемой. Для ее решения при литье цветных и черных сплавов технологи используют литье под давлением, под низким давлением, вакуумным всасыванием, центробежное, т. е. способы литья, создающие силы внешнего воздействия на расплав, превышающие гравитационные.

Известно, что литье под давлением родилось в типографском деле, где главной задачей была задача получения весьма точных, миниатюрных, с высоким качеством воспроизведения конфигурации изделий – печатных литер. Первоначально литье под давлением было призвано решать задачу весьма качественного заполнения формы расплавом и обеспечения высокой производительности труда при массовом производстве. Заметим, что

при этом не возникало проблем, связанных с прочностью, а тем более герметичностью изделия, т. е. проблем, решение которых в настоящее время определяет возможности расширения области использования этого прогрессивного технологического процесса. Указанные проблемы возникли именно в связи со стремлением расширить область применения литья под давлением и использовать основные достоинства процесса: получение точных изделий с высоким качеством поверхности при достаточной производительности процесса. При этом уже на начальной стадии освоения процесса в машиностроении проблема заполнения формы, т. е. четкого воспроизведения расплавом конфигурации рабочей полости пресс-формы, не являлась для литейщиков основной. Гораздо более сложной оказалась проблема получения плотных, без газовоздушных пор герметичных отливок.

Заполнение газонепроницаемой формы с расходом расплава через питатель, превышающим расход газовоздушной смеси через систему вентиляции, привело к особой постановке задачи заполнения формы, к новым техническим решениям (вакуумирование полости, O_2 -процесс и т. д.). Почти аналогичным путем развивались и процессы литья под давлением другой группы – литье под регулируемым давлением.

Важно отметить, что на первоначальном этапе процессы литья под давлением были направлены также на решение проблемы заполнения полости формы при изготовлении тонкостенных отливок [6, 7, 8]. Только по мере изучения, освоения этих процессов, познания их закономерностей взгляды на технологические возможности указанных процессов изменились и расширились. Вместе с тем широко используется для улучшения заполнения форм тонкостенных отливок возможность приложения к расплаву центробежных сил, превышающих гравитационные.

Таким образом, одна из проблем, решаемых специальными способами литья, – заполнение формы расплавом. Несмотря на многовековую историю литья как способа обработки металлов и сплавов, эта задача для литейщиков извечна и постоянна. Более того, чем дальше будет совершенствоваться технология, тем более сложные задачи заполнения формы будут возникать перед литейщиками. Современному технологю, располагающему мощными средствами заполнения формы, эта задача часто представляется второстепенной, и на первый план выдвигаются такие, как: получение отливок с требуемыми механическими свойствами, герметичностью, ше-

роховатостью поверхности, структурой и т. д. Однако не следует забывать, что если литейная форма не заполнена расплавом и возникли недолив или неслитины в отливке, то все остальные требования к ней теряют смысл, так как изделие не получено.

Другая особенность технологии литья – переход обрабатываемого материала из жидкого состояния в твердое, сопровождающийся изменениями объема (усадкой), образованием усадочных раковин, рыхлот, пористости, снижением герметичности и механических свойств отливок. В этой связи вторая важная проблема, которая решалась литейщиками при создании и использовании специальных видов литья, – получение отливок без усадочных дефектов. Начало этим работам было положено трудами Д. К. Чернова, впервые указавшего на возможность получения отливок, свойства которых не уступают свойствам кованных заготовок, путем воздействия на отливку при ее кристаллизации давлением газа, давлением поршня, перемешиванием расплава в затвердевающей слитке, полем центробежных сил.

Возможности воздействия на процесс формирования отливки, устранения усадочных и газовых пустот при различных способах литья достаточно обширны. Многие специальные способы литья, особенно технологические процессы с использованием давления на затвердевающую отливку, обладают большими резервами повышения качества отливок. Специальные способы литья в комплексе решают проблемы заполнения форм и получения отливок с конфигурацией и размерами, максимально приближающимися к готовому изделию, уменьшения вредного воздействия усадочных процессов на плотность, герметичность, механические свойства отливок. В этой связи и развитие автоматизации специальных способов литья необходимо связать с управлением процессами заполнения форм и кристаллизацией отливок.

1.2. Исследования процессов литья с использованием давления

В литейном производстве проблема управления питанием отливок не претерпела заметных изменений. Изменялись только технические средства ее решения. Прибыли – специально предусмотренные в литниково-питающих системах объемы металла – оставались, повышалась только эффективность их работы за счет увеличения давления в прибылях, утяжеления расплава электромагнитными полями, центробежного ускорения, использования вибрации, ультразвука и других средств. С помощью таких средств

пытались не только повысить плотность отливок, но и уменьшить число и объем прибылей и этим увеличить выход годного литья.

Главным в проблеме управления заливкой является заполнение полости формы расплавом, т. е. выбор такого способа и такого режима заливки, при которых гарантировано заполнение расплавом полости формы для данной отливки. При решении этой проблемы долгое время уделяли основное внимание следующим ее аспектам: улавливание шлака, предохранение поверхности стенок полости формы от разрушения, предупреждение "захвата" воздуха потоком расплава в литниковой системе и т. п. В процессе развития литейного производства эта проблема претерпела заметные изменения. [9, 10].

Так, создание и промышленное использование прочных песчано-смоляных смесей для форм и стержней снизили опасность разрушения поверхности стенок формы, образования зазора и механического пригара. При литье в кокиль возможно приваривание отливки к поверхности формы. В процессе промышленного использования этого способа литья технологи нашли решение – разработали различные огнеупорные краски и облицовки [11].

Совершенствование процесса плавки и повышение технологической культуры рафинирования и дегазации расплава, а также его внепечной обработки исключили попадание в полость формы первичных шлаков вместе с расплавом. Создание алюминиевых и магниевых сплавов и использование в технике деталей из них связаны с проблемой предотвращения образования вторичных шлаков в процессе заливки расплава этих и им подобных (легко окисляемых) сплавов в форму. В процессе промышленного освоения литья из алюминиевых и магниевых сплавов были разработаны специальные конструкции литниковых систем, «успокаивающих» поток расплава перед поступлением его в полость формы. Широкое внедрение сначала машинной, а затем автоматической формовки привело к необходимости создания и промышленного использования многоместных форм, в том числе для отливок разной конфигурации и массы, заливаемых через один стояк. Это достижение потребовало включения в состав проблемы создания литниковых систем наименьшей массы для повышения выхода годного литья [12, 13].

Потребность машиностроения и приборостроения в крупных партиях заготовок тонкостенных литых деталей сложной конфигурации, разных габаритов и высокой точности размеров и массы стимулировала прогресс

таких процессов, как литье под давлением, литье в формы, изготавливаемые по выплавляемым моделям, литье выжиманием, литье под низким давлением и вакуумным всасыванием, литье в формы, вращающиеся на столе центробежной машины, и т. д., т. е. таких способов литья, в которых проблема заливки расплава решается в главной ее части – гарантированное заполнение расплавом полости формы.

Постепенное промышленное освоение и использование перечисленных способов литья выявили их особенности и обусловили необходимость названия перечисленных способов специальными видами литья. Однако в основном, т. е. в обеспечении гарантированного заполнения полости формы расплавом и требуемой плотности отливок, принципиальных различий между этими способами нет. Есть различия только в технических средствах достижения.

Теоретические исследования и основные положения теории литейных процессов связаны с обеспечением производства качественных отливок.

Охлаждение потока перегретого расплава

Расчетная схема. Охлаждение потока перегретого расплава измеряется при его течении в прямолинейном канале, выполненном в форме плоской щели, т. е. когда высота канала намного меньше его ширины. Далее расплав из литниковой системы входит в канал под постоянным во времени гидростатическим напором, при этом считается, что гидравлическое сопротивление канала потоку расплава будет уменьшать его начальную скорость настолько незначительно, что ее можно принять как неизменную во время течения расплава. Схематически форма для расчета представлена на рис. 1.

Возможность такого допущения при литье в металлические формы следует из опытов Б. Б. Гуляева (см. рис. 1) [14]. Изменения пути потока во время течения расплава углеродистой стали 1, серого чугуна 2 и силумина 3 в горизонтальном канале сечением 1×8 мм песчаной формы под напором расплава в стояке 110 мм приведены на рис. 2. Кривые 1, 2, 3 на рис. 2 мало отличаются от прямых, поэтому можно принять, что скорость потока перегретого расплава во времени неизменна и равна

$$\mu = \mu \sqrt{2gH}. \quad (1)$$

$$\mu = 1 + \lambda l / b + \sum_{j=1}^n \xi_j, \quad (2)$$

где λ - коэффициент потери напора на трение; l - длина заполненной части канала; b - его толщина; ξ_j - потери напора в местных гидравлических сопротивлениях литниковой системы [15].

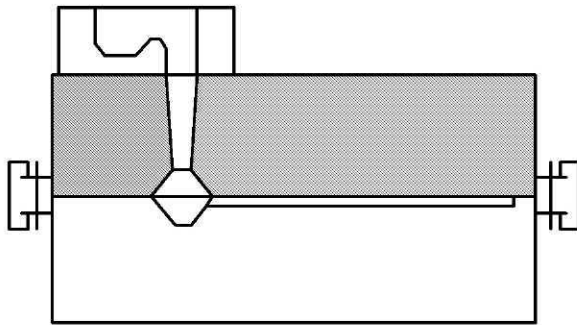


Рис. 1. Форма для отливки пластинчатой пробы

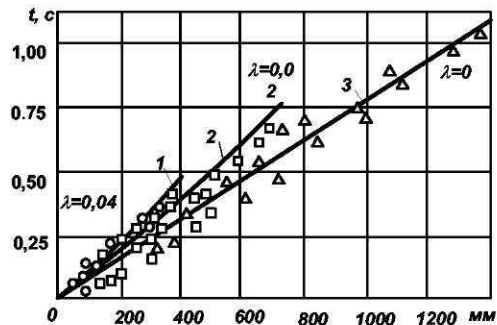


Рис. 2. Изменение пути потока расплава во времени

Расплав при температуре $t_{\text{зал}}$ заливки из ковша входит в канал со скоростью u . Если к моменту времени τ носик потока прошел путь $Z=ut$, то расплав в сечении канала, отстоящем от входа в него на расстоянии $z < Z$, должен иметь температуру $t < t_{\text{зал}}$. Это уменьшение температуры обусловлено охлаждением расплава на пути z , т. е. в течение времени $\tau = z/u$ движения расплава от входа в канал до рассматриваемого его сечения.

Кинетика охлаждения потока в металлической форме. За бесконечно малый промежуток времени $d\tau$ теплосодержание расплава в объеме $S\Delta l$ изменится на величину $c\rho S\Delta l dt$.

Точно такое же количество теплоты должно быть отведено от поверхности $P\Delta l$ этого объема расплава в форме за тот же промежуток времени $d\tau$:

$$\beta(t_{\text{зал}} - t)P\Delta l d\tau, \quad (3)$$

где P – периметр сечения канала;

$$t = \begin{cases} \frac{(t_{\text{зал}} - t_c) - (t_{\phi} - t_c)c_{\phi}\rho_{\phi}V_{\phi}/(c\rho V_0)}{1 + c_{\phi}\rho_{\phi}V_{\phi}/(c\rho V_0)} + t_c, & \text{если } 0,5 \leq l_{\phi}/l_0 \leq 10; \\ t_c, & \text{если } l_{\phi}/l_0 < 0,5; \end{cases} \quad (4)$$

$$\beta = \begin{cases} \beta(t_{\text{зал}} - t_{\phi})/(t_{\text{зал}} - t), & \text{если } 0,5 \leq l_{\phi}/l_0 \leq 10; \\ \beta\alpha_c/(\alpha_c + \beta), & \text{если } l_{\phi}/l_0 < 0,5, \end{cases} \quad (5)$$

где α_c – коэффициент теплоотдачи металлической формы в окружающую среду, Вт/(м²·К), β – коэффициент тепловой проводимости кокильной краски, Вт/(м²·К); λ_0 – коэффициент теплопроводности отливки, Вт/(м·К); t_c – температура среды, °С; c_{ϕ} – теплоемкость формы, Дж/(кг·К); ρ_{ϕ} – плотность материала формы, кг/м³; V_{ϕ} – объем формы, м³, V_0 – объем отливки, м³; l_{ϕ} – толщина стенок формы, м; l_0 – толщина стенок отливки, м, ρ – плотность отливки, кг/м³; c – теплоемкость отливки, Дж/(кг·К).

Очевидно, что

$$-c\rho Rdt = \beta(t_{\text{зал}} - t)dz/u, \quad (6)$$

где $R = S/P$ – приведенный размер.

Выражение (6) является дифференциальным уравнением процесса охлаждения потока перегретого расплава в металлической форме.

Начальное условие процесса

$$t(0) = t_{\text{зал}}. \quad (7)$$

Решение дифференциального уравнения (6) с учетом условия (7) имеет вид

$$t = t_{\text{зал}} - [\beta/c\rho Ru](t_{\text{зал}} - t)_z. \quad (8)$$

Кинетика охлаждения потока перегретого расплава в металлической форме имеет отличительную особенность. Действительно, как это следует из формулы (8), в сечении канала, отстоящем от входа в него на расстоянии $0 < z < Z$, температура t расплава остается неизменной и не зависит от

длины Z потока (рис. 3). Но температура t_n расплава у носика потока непрерывно понижается. Из формулы (8) при $z = Z$

$$t_n = t_{\text{зал}} - [\beta / c\rho Ru](t_{\text{зал}} - t)Z. \quad (9)$$

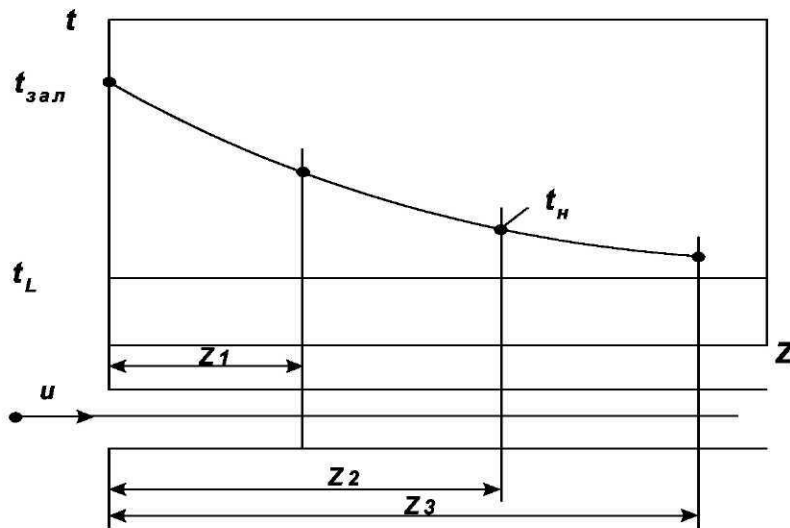


Рис. 3. Температурное поле по длине потока расплава в металлической форме

Т.е. t_n потока расплава в форме будет понижаться до тех пор, пока она не приобретет значение температуры t_L ликвидуса заливаемого сплава. Затем начнется и будет развиваться затвердевание расплава при его дальнейшем движении в потоке.

Потери перегрева расплава при литье в кокиль

Пусть полость формы представляет собой прямоугольный параллелепипед (рис. 4, а), расплав в эту полость подводится щелевым питателем снизу от коллектора, который соединен со стояком; литниковая система спроектирована так, что при заливке она всегда будет заполнена расплавом, т. е. литниковая система сужающаяся, у которой $f_n < f_k < f_c$ (где f_n , f_k , f_c – соответственно площади поперечного сечения питателя, коллектора и стояка) [16, 17].

Если H_c и R_c – протяженность стояка и его приведенный размер, то температуру t_c на выходе из стояка (на входе в коллектор) можно рассчи-

тать по формуле (8) при $Z=H_c$. Разность между $t_{\text{зал}}$ и t_c будет характеризовать потерю перегрева расплава при его течении по стояку [18]. Из (8) следует

$$t_{\text{зал}} - t_c = [\beta / (c\rho R_c u_c)] (t_{\text{зал}} - t) H_c, \quad (10)$$

где u_c — средняя скорость течения расплава по стояку.

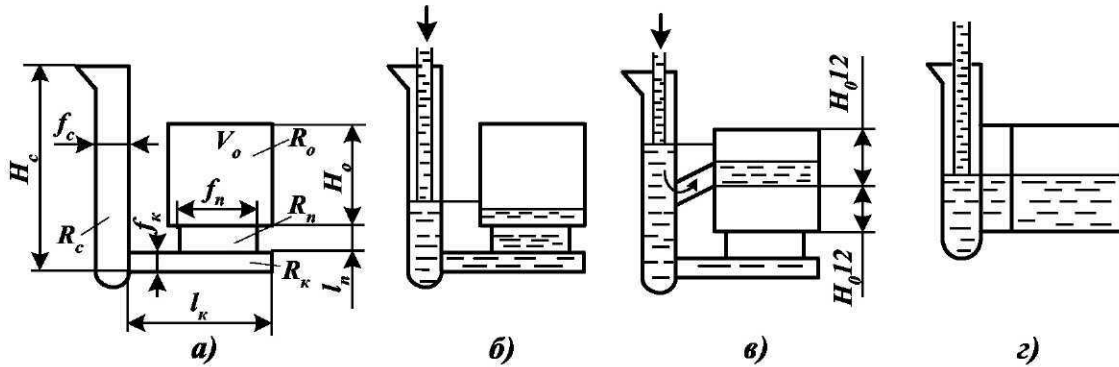


Рис. 4. Схемы литниковых систем

Если известны l_k , R_k и u_k (рис. 4, а), то можно рассчитать потерю перегрева расплава при его течении по коллектору:

$$t_c - t_k = [\beta / (c\rho R_k u_k)] (t_{\text{зал}} - t) l_k. \quad (11)$$

Эта формула получена в результате решения дифференциального уравнения (6) при условии, что $t(0)=t_c$ и для $Z=l_k$, где t_k - температура расплава на выходе из коллектора (на входе в питатель).

Аналогично, если известны l_n , R_n и u_n , то из дифференциального уравнения (6) при $t(0)=t_k$ и $Z=l_n$ получим, что потеря перегрева расплава при его течении по питателю

$$t_k - t_n = [\beta / (c\rho R_n u_n)] (t_{\text{зал}} - t) l_n, \quad (12)$$

где t_n - температура расплава на выходе из питателя (на входе в полость формы).

Суммарная потеря перегрева расплава при его течении по каналам всей литниковой системы составит

$$t_{\text{зал}} - t_n = \frac{\beta(t_{\text{зал}} - t)}{c\rho} \left(\frac{H_c}{R_c u_c} + \frac{l_k}{R_k u_k} + \frac{l_n}{R_n u_n} \right). \quad (13)$$

Так как согласно правилу неразрывности потока [20] $u_{\text{п}}f_{\text{п}} = u_{\text{к}}f_{\text{к}} = u_{\text{с}}f_{\text{с}}$, полученную формулу можно записать иначе:

$$t_{\text{зал}} - t_{\text{п}} = \frac{\beta(t_{\text{зал}} - t)}{c\rho} \left(\frac{H_{\text{с}}}{R_{\text{с}}} \frac{f_{\text{с}}}{f_{\text{п}}} + \frac{l_{\text{к}}}{R_{\text{к}}} \frac{f_{\text{к}}}{f_{\text{п}}} + \frac{l_{\text{п}}}{R_{\text{п}}} \right), \quad (14)$$

где $V_0/\tau_{\text{зал}} = u_{\text{с}}f_{\text{п}}$ – средний расход расплава из питателей, $\tau_{\text{зал}}$ – время заполнения полости формы.

Расчет потери перегрева расплава при течении его в полости формы. Если R_0 – приведенный размер отливки, H – подъем расплава (см. рис. 4, а) и u_0 – средняя скорость его подъема в полости формы, то из дифференциального уравнения (6) при $t(0)=t_{\text{п}}$ для $Z=H$ найдем, что

$$t_{\text{к}} - t_{\text{п}} = [\beta/(c\rho R_0 u_0)](t_{\text{зал}} - t)H. \quad (15)$$

Пусть к моменту окончания заполнения полости формы, т. е. при $H=H_0$, температура расплава приобретает минимально допустимое значение $t=t_L$, при котором еще не начинается затвердевание потока. Тогда из (15)

$$t_{\text{к}} - t_0 = [\beta/(c\rho R_0 u_0)](t_{\text{зал}} - t)H_0, \quad (16)$$

а так как $H_0/u_0 = \tau_{\text{зал}}$, то из (11) средний расход расплава из питателей

$$V_0/\tau_{\text{зал}} = \left\{ \beta(t_{\text{зал}} - t) / [c\rho(t_{\text{п}} - t_0)] \right\} F_0, \quad (17)$$

где F_0 – площадь поверхности охлаждения отливки в форме. Таким образом, общая потеря перегрева расплава при заполнении формы выразится формулой

$$t_{\text{зал}} - t_0 = \frac{\beta(t_{\text{зал}} - t)}{c\rho V_0/\tau_{\text{зал}}} \left[F_0 + f_{\text{п}} \left(\frac{H_{\text{с}}}{R_{\text{с}}} \frac{f_{\text{с}}}{f_{\text{п}}} + \frac{l_{\text{к}}}{R_{\text{к}}} \frac{f_{\text{к}}}{f_{\text{п}}} + \frac{l_{\text{п}}}{R_{\text{п}}} \right) \right]. \quad (18)$$

На основании анализа формулы (18) можно сделать вывод о необходимости создания такого режима заливки, который обеспечивал бы минимальную потерю перегрева расплава при течении его в полости формы [19–22]. Для этого можно предложить следующие пути решения:

1. Увеличение приведенных размеров элементов литниковой системы, т.е. увеличение $R_{\text{с}}$, $R_{\text{к}}$ и $R_{\text{п}}$. Так как $R=V/F$, то возможно лишь уменьшение

площади поверхности этих элементов, ибо увеличение их объемов приведет к снижению выхода годного литья, т. е. к уменьшению отношения $V_0/(V_0+V_c+V_k+V_n)$. Ясно, что площадь поверхности элементов литниковой системы будет наименьшей, если элементы выполнены цилиндрическими. Известно, что технологи всегда стремятся именно к такой конструкции литниковой системы.

2. Очевидно, что существенное уменьшение потери перегрева расплава при литье возможно путем уменьшения тепловой проводимости β кокильной краски. Реально это достигают увеличением ее толщины [20]. Для каналов литниковых систем используют более толстый слой краски. Однако в условиях производства, особенно массового, к такому, хотя и эффективному приему, прибегают редко, ибо он снижает производительность труда; слой краски необходимо тщательно ремонтировать, зачищать и т. д. — все это очень трудоемко.

3. Увеличение расхода. Очевидно, что существенное уменьшение потери перегрева расплава при заполнении формы возможно повышением расхода $V_0/\tau_{\text{зап}}$ расплава из питателя. Есть два пути повышения расхода: во-первых, увеличение площади f_n питателей, но это приведет к увеличению массивности литниковой системы; во-вторых, увеличение скорости u_n истечения расплава из питателей, что требует значительного увеличения напора H_c (см. рис. 4, а). Этого можно добиться также с помощью внешних факторов — давления или вакуумирования.

Развитие литейной технологии пошло по второму пути. Начали применять литье под давлением, заливку в формы, установленные на столе центробежной машины, литье вакуумным всасыванием, в котором одновременно решалась проблема вентиляции полости формы во время ее заполнения, и литье под низким давлением [6, 8, 23 – 31]. Этот путь также является предпочтительным для автоматизированных процессов, так как параметры накладываемого давления или разрежения достаточно легко определить и скорректировать.

Рассмотрение второй задачи, т.е. получение отливок без внутренних дефектов в основном заключается в исследовании природы газоусадочной пористости.

Образование усадочной пористости в отливках

Затвердевание расплава большинства литейных сплавов сопровождается уменьшением объема [33 – 35]. Если к моменту окончания затвердева-

ния отливки средний объем каждого из кристаллов, составляющих ее тело, V , то, следовательно, каждый из них вырос из объема $(1+\epsilon_v) V$ расплава (ϵ_v – объемная усадка данного сплава). Пусть в отливке N кристаллов, тогда ее объем равен NV , а объем V расплава, который требуется залить в форму, должен быть равным $(1+\epsilon_v) NV$. Избыток $\epsilon_v NV$ расплава обычно размещают в прибыли или питающей бобышке. Если скорость роста каждого кристалла меньше или равна скорости подачи расплава к поверхности его роста, то весь избыток будет израсходован и отливка получится плотной. В противном случае между кристаллами образуются пустоты – усадочные поры.

Наибольшая пористость сосредоточивается в центральной части тела отливки. На рис. 5, а приведена схема затвердевания элемента плоской стенки отливки в кокиле. Так как расплав интенсивнее охлаждается по поверхности формы, то его температура t_0 всегда ниже, чем вдали от этой поверхности. Часть тела отливки, которая к рассматриваемому моменту времени τ находится при $t < t_S$, является твердой. В интервале $t_S < t < t_L$ расплав находится в двухфазном состоянии. Наконец, при $t > t_L$ расплав перегрет. Очевидно, что этот расплав может беспрепятственно проникать между кристаллами в двухфазной области затвердевания.

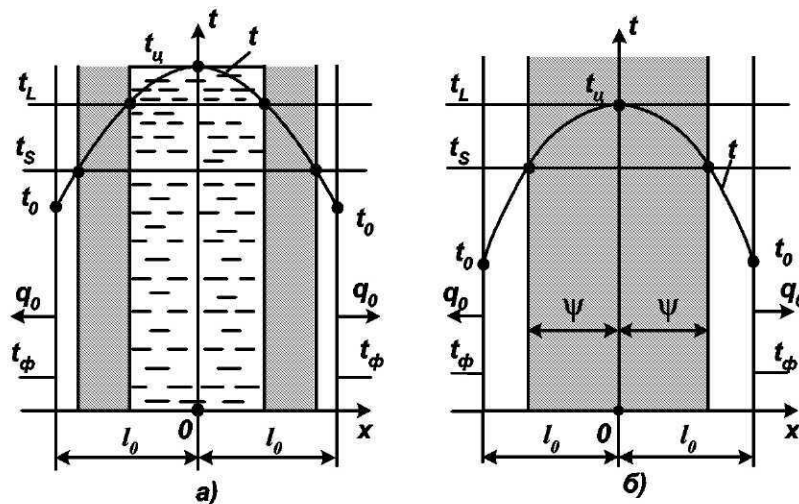


Рис. 5. Схемы затвердевания элемента плоской отливки в металлической форме

Картина существенно меняется после того, как температура расплава достигнет температуры t_L (рис. 5, б). Центральная часть тела отливки с этого момента времени будет находиться только в двухфазном состоянии.

Расплав к поверхности растущих кристаллов может подаваться только из прибыли путем фильтрации между этими кристаллами. По мере разрастания кристаллов скорость фильтрации будет уменьшаться и, следовательно, возникнет ситуация, при которой именно здесь образуются усадочные поры [35].

Исходя из этих соображений И. Б. Куманин [19] предложил склонность сплавов к образованию в отливке усадочной пористости оценивать относительной протяженностью ψ центральной части ее тела l_0 , когда в ней возникают условия, приводящие к затруднению фильтрации расплава между растущими кристаллами (см. рис. 5, б).

Другими словами, он предложил усадочную пористость в отливке оценивать как

$$\Pi = A\psi/l_0, \quad (19)$$

где A – эмпирический множитель пропорциональности.

Позже А. И. Вейник предложил следующий способ расчета ψ/l_0 [36]. Пусть распределение температуры $t(x,t)$ в затвердевающей отливке (см. рис. 5, а) аппроксимировано параболой порядка n :

$$t = t_0 + (t_u - t_0)[1 - (x/l_0)^n]. \quad (20)$$

Тогда в интересующий момент времени, т. е. при $t_u = t_L$ эта формула примет вид

$$t = t_0 + (t_L - t_0)[1 - (x/l_0)^n]. \quad (21)$$

Относительную протяженность ψ/l_0 центральной части тела отливки можно определить по формуле (19), приняв $t = t_S$, ибо в этом случае $x = \psi$ (см. рис. 5, б). Получим

$$\psi/l_0 = (t_L - t_S)^{1/n} / (t_L - t_0). \quad (22)$$

Так как тепловое взаимодействие между отливкой и формой происходит в соответствии с граничными условиями третьего рода, то

$$-\lambda[dt(l_0, t) / \partial x] = \beta(t_0 - t), \quad (23)$$

где λ – коэффициент теплопроводности сплава, Вт/(м·К). Из (19) следует

$$\partial t(l_0, t) / \partial x = -(n/l_0)(t_L - t_0). \quad (24)$$

Следовательно,

$$t_0 = t_L + (t_L - t) / [1 + \lambda n / (\beta l_0)]. \quad (25)$$

Подставляя это выражение для t_0 в формулу (19), найдем

$$\Pi = A \left\{ [(t_L - t_S) / (t_L - t)] [1 + \lambda n / (\beta l_0)] \right\}^{1/n}. \quad (26)$$

Из анализа полученной формулы можно сделать следующие выводы:

- полученная формула точно отражает известный факт повышения склонности сплавов к образованию усадочной пористости с увеличением интервала $(t_L - t_S)$ их кристаллизации;
- формула (26) хорошо отражает трудности получения плотных тонкостенных отливок – с уменьшением l_0 пористость Π растет. Особенно это касается отливок из легких сплавов, т. е. сплавов алюминия и магния, так как у них большая величина коэффициента λ и низкая температура t_L ;
- наконец, формула (26) отражает и то, что увеличение интенсивности охлаждения затвердевающей отливки, например за счет увеличения $\tilde{\beta}$ кокильной краски, пористость снижается. Однако согласно (26) избавиться от нее не удастся.

Учитывая изложенное, можно указать два пути повышения плотности отливок.

1. Ускорение фильтрации расплава в центральной части отливки. Этот путь породил все способы литья с применением давления в прибылях, литье в автоклавах, литье под давлением и подпрессовкой и т. п.

2. Направленное затвердевание отливки, исключаящее образование сплошной двухфазной зоны в ее теле.

Оба пути могут быть осуществлены с помощью наложения давления, которое, если учесть кинетику кристаллизации, следует накладывать по определенному закону. Этот закон необходимо привести в соответствие со скоростью кристаллизации и формированием кристаллического строения.

Таким образом, можно сделать вывод о предпочтительном использовании давления как дополнительного технологического фактора.

1.3. Технологические особенности управляемых процессов литья с использованием давления

Режимы заполнения формы

К важнейшим параметрам технологического процесса относятся: продолжительность $\tau_{\text{зап}}$ заполнения пресс-формы расплавом, скорость впуска расплава в пресс-форму, определяемая конструкцией и размерами литниковой системы и скоростью прессования, размеры и расположение вентиляционных каналов, количество и свойства смазочного материала пресс-формы, температура расплава и пресс-формы.

Продолжительность заполнения пресс-формы в зависимости от толщины стенки отливки для разных сплавов приведена на рис. 6 [37, 38]. По этим данным продолжительность заполнения, найденная для определенных, наиболее характерных для данных сплавов температур заливки расплава в пресс-формы, зависит только от толщины тела отливки и не зависит от ее размеров. Эти данные определяют только расход металла через питатель, обеспечивающий получение отливки без неслитин и неспаев, и соответствуют получению отливок с невысокими требованиями к их плотности.

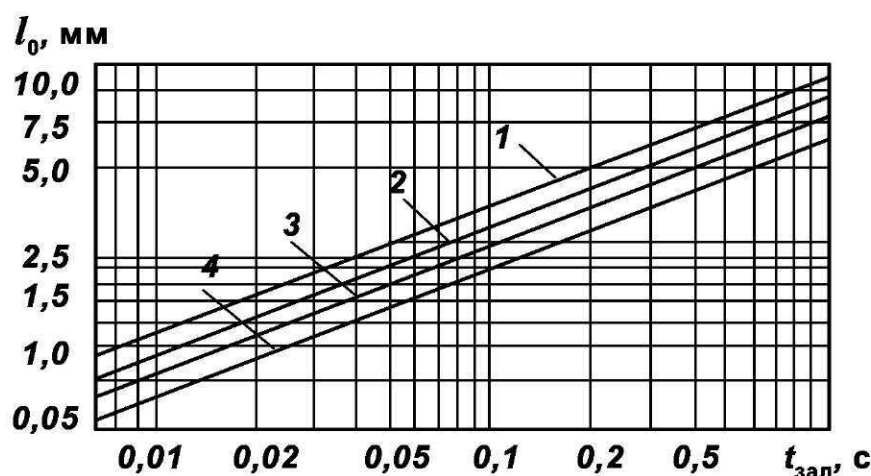


Рис. 6. Зависимость времени заполнения $\tau_{\text{зап}}$ от средней толщины l_0 стенки для отливок:
1 – из чистого магния; 2 – из магниевых сплавов;
3 – из алюминиевых сплавов; 4 – из цинковых сплавов

Скорость впуска расплава в пресс-форму в зависимости от свойств сплава, толщины стенки отливки, ее протяженности и конфигурации может быть определена по формуле П. П. Москвина [36]:

$$U = KX_{\text{отл}} / \sqrt{\tau_{\text{зап}}}, \quad (27)$$

где K – коэффициент, зависящий от температуры заливаемого сплава и имеющий размерность коэффициента затвердевания $\text{м/с}^{1/2}$; для алюминиевых и медных сплавов $K = 0,015 - 0,03$; для магниевых $K = 0,018 - 0,035$; для цинковых $K = 0,013 - 0,025$, $X_{\text{отл}}$ – безразмерная величина, характеризующая конфигурацию отливки.

$$X_{\text{отл}} = (L/L_0)\sqrt{\Sigma n + 1},$$

где L – длина отливки; L_0 – средняя или преобладающая толщина стенки отливки; n – число поворотов потока расплава в полости формы под углом 90° .

Для использования метода необходимо установить продолжительность $\tau_{\text{зап}}$ заполнения формы, пользуясь, например, зависимостями рис. 7. Этот метод применим для тонкостенных отливок средних размеров (200 – 400 мм) с невысокими требованиями по герметичности.

Температуру пресс-формы перед заливкой назначают с учетом состава заливаемого сплава, конфигурации отливки, толщины ее стенки, а также других факторов. Температуру формы принимают для сплавов: цинковых 393 – 433 К, алюминиевых 453 – 523 К, магниевых 473 – 513 К, латуни 553 – 593 К, стали 473–553 К [39]. С уменьшением толщины стенки отливки и усложнением ее конфигурации температуру формы назначают ближе к верхнему пределу указанных интервалов, для более массивных отливок – ближе к нижнему. Соблюдение этого принципа позволяет при изготовлении тонкостенных отливок улучшить заполнение формы расплавом, а для более массивных – повысить скорость затвердевания и уменьшить количество усадочных дефектов. Для регулирования температурного режима работы форм, управления процессом затвердевания и охлаждения отливки в конструкциях пресс-форм предусматривают системы охлаждения или тепловой изоляции отдельных элементов форм [40].

Использование смазки пресс-форм литья под давлением обеспечивает защиту их поверхности от химического, механического, теплового воздей-

ствия струи расплава, предотвращение «приваривания» отливки к пресс-форме, а также уменьшение усилия извлечения из нее стержней и вставок во избежание их поломки, деформаций отливки при извлечении ее из пресс-формы [41].

Смазочные материалы пресс-форм должны обладать высокими смазывающими и противозадирными свойствами при температурах взаимодействия отливки и пресс-формы, иметь минимальную газотворность при разложении под действием высоких температур, не оказывать вредного влияния на свойства отливок (герметичность, газосодержание, коррозионную стойкость), не воздействовать на поверхность пресс-формы и отливки, быть нетоксичными, не содержать дефицитных материалов. Кроме этого смазочный материал должен сохранять свои свойства при хранении, быть пожаро- и взрывобезопасным, обладать такими свойствами, чтобы его можно было наносить на поверхность пресс-формы автоматическими устройствами [41].

Процессы, происходящие в системе отливка – смазочный материал – поверхность пресс-формы, весьма сложны, механизм действия смазочных материалов при литье под давлением изучен недостаточно, поэтому их выбор представляет сложную задачу. Чаще всего в производстве для автоматизированного нанесения используют смазочные материалы – эмульсии масла в воде или органических растворителях с добавками твердых наполнителей со сложной молекулярной структурой и различных химически активных присадок.

Температура заливки расплава зависит от химического состава сплава, конфигурации, размеров отливки и выбранного режима заполнения пресс-формы. При заполнении пресс-форм значительно перегретым расплавом последний может проникнуть в вентиляционные каналы пресс-формы, закупорить их, что приведет к увеличению в отливках газовой пористости, а в некоторых случаях – к незаполнению формы. Высокая температура расплава способствует увеличению объема усадочных пор в отливке; длительность затвердевания и охлаждения отливки возрастает, а это снижает темп работы машин; возрастает тепловая нагрузка на пресс-форму, вследствие чего снижается ее стойкость; увеличивается опасность «приваривания» отливки к пресс-форме, создается опасность поломки отливки или пресс-формы при выталкивании отливки. Поэтому при заполнении формы в режимах, близких к режимам максимального трения, стремятся заливать расплав при возможно более низкой температуре: для цветных сплавов

температура заливки расплава в камеру прессования обычно на 10 – 30° выше ликвидуса. С увеличением размеров отливки и уменьшением толщины ее стенки температуру заливки принимают ближе к верхнему пределу; для массивных отливок простой конфигурации – ближе к нижнему.

Для массивных отливок, а также отливок с повышенными требованиями по плотности часто температуру расплава принимают в интервале ликвидус – солидус, т. е. производят заливку твердо-жидким расплавом. Это позволяет обеспечить последовательное вытеснение воздуха и газов из пресс-формы и уменьшить объем усадочных пор в отливке. Одновременно уменьшается тепловая нагрузка на пресс-форму, повышается ее стойкость, уменьшается продолжительность охлаждения отливки, опасность ее «приваривания» к пресс-форме, возрастает надежность работы машины.

Влияние давления на расплав

Различают динамическое [38, 42] и статическое давления [28 – 30, 43].

Динамическое давление действует в движущемся потоке расплава в процессе заполнения им формы, если он встречает сопротивление (повороты, стенки формы, стержни). В случае их отсутствия давление в потоке определяется сопротивлением воздуха и газов и их противодействием в полости пресс-формы. При небольших скоростях впуска гидродинамическое давление невелико, например, при $U = 15$ м/с среднее гидродинамическое давление при литье алюминиевого сплава 0,6 – 1 МПа [44].

Статическое давление на затвердевающий расплав передается от прессующего плунжера только в том случае, если питатель затвердевает позже или одновременно с отливкой. Процессы передачи статического давления на отливку называют подпрессовкой [38].

При заполнении формы расплавом, подаваемым сплошным ламинарным потоком, зависимость давления на расплав от времени подобна изменению давления рабочей жидкости в полости прессового цилиндра. На рис. 7 приведены осциллограммы давления p рабочей жидкости в полости цилиндра за время τ рабочего хода прессующего поршня.

За время τ_1 поршень перемещается до заливочного отверстия в камере прессования и перекрывает его. Значение p_1 соответствует давлению, необходимому для преодоления трения в поршневой паре и гидросистеме.

Период τ_2 соответствует заполнению под действием поршня всего объема камеры прессования расплавом, вплоть до литниковой системы. Давление p_2 больше давления p_1 на величину сопротивления в камере прессования.

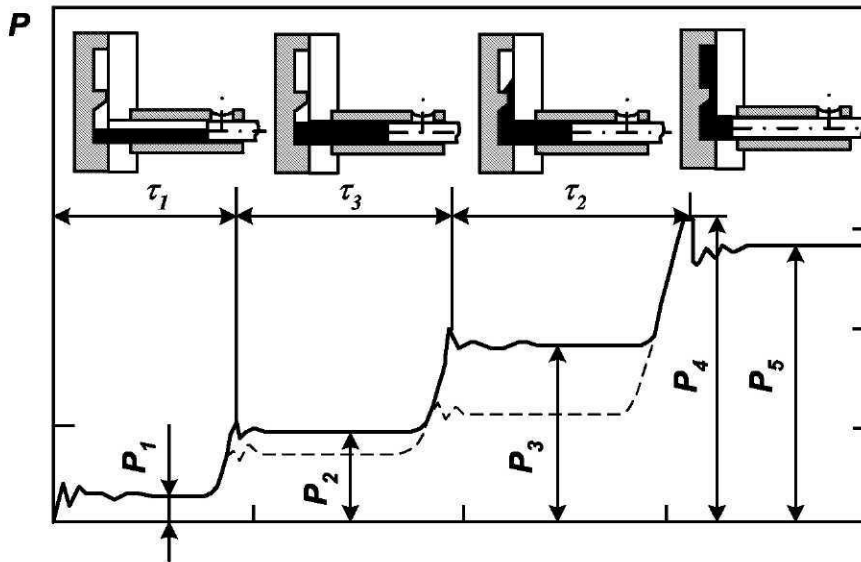


Рис. 7. Осциллограммы давления в гидроцилиндре механизма прессования

В период τ_3 происходит заполнение литниковой системы и полости формы. Давление p_3 повышается вследствие преодоления гидродинамических сопротивлений движению расплава и противодействия воздуха. Если полость формы вакуумируется, то значения p_2 и p_3 уменьшаются (пунктирная линия на рис. 7). В момент окончания движения прессующего плунжера включается мультипликатор, и давление прессования резко возрастает до значений p_4 , при этом во многих механизмах прессования происходит гидравлический удар, возникающий из-за инерционных сил в момент остановки прессующего плунжера, который отрицательно влияет на работу гидросистемы машины, так как приводит к разрыву трубопроводов, их вибрации и т. д. В дальнейшем колебания жидкости затухают и давление становится равным статическому давлению подпрессовки p_5 .

Требуемое статическое давление прессования зависит от состава сплава, его свойств (вязкости, плотности), эффективности работы системы вентиляции, конфигурации и толщины стенки отливки, требований к ее качеству (плотности, герметичности, состоянию поверхности). Оно изменяется в пределах 30 – 300 МПа. Если к моменту достижения давления p_3

питатель не затвердевает, то это давление передается от машины на затвердевающую отливку.

Для повышения качества отливки необходимо, чтобы максимальное давление подпрессовки развивалось прессующим механизмом в момент начала затвердевания отливки, практически сразу после окончания заполнения формы, пока питатель не успел затвердеть.

При заполнении формы расплавом, который подается сплошным турбулентным или дисперсным потоком, подпрессовка позволяет сжать воздушно-газовые включения в теле отливки, что резко уменьшает их размеры, повышает герметичность и прочность отливки. Однако отливки, полученные этим способом, нельзя нагревать и обрабатывать термически из-за вздутия их вследствие расширения газов в порах.

При заполнении формы ламинарным потоком через толстый питатель подпрессовка позволяет уменьшить усадочную пористость в отливке и улучшить качество ее поверхности, особенно если сплав заливают в твелообразном состоянии.

Небольшая скорость впуска и подпрессовка способствуют получению плотных, с минимальной воздушно-газовой и усадочной пористостью отливок с толщиной стенки 5 – 8 мм и более, а также отливок из высокопрочных сплавов, упрочняемых термической обработкой. Это расширяет область применения способа литья под давлением. Для уменьшения газовой и воздушной пористости в отливках под давлением кроме повышенных давлений прессования, создания рациональных конструкций литниковой и вентиляционной систем пресс-формы, выбора оптимальных режимов литья – скорости прессования, температуры расплава и пресс-формы, давления прессования – разработаны и используются в производственных условиях специальные способы литья под давлением, направленные на уменьшение газовой и воздушной пористости в отливках.

Реализация этих специальных способов вызывает дополнительные затраты, усложнения конструкций пресс-форм, машин литья под давлением, организации производственного процесса [45]. Такие затраты окупаются только при необходимости изготовления отливок под давлением с особыми требованиями к их качеству.

К числу специальных способов литья под давлением, направленных на уменьшение газовой и воздушной пористости в отливках, относят литье с использованием вакуумирования пресс-формы, литье с регулированием состава газов в полости пресс-формы.

Давление прессования зависит от толщины стенки отливки, ее размеров и конфигурации, химического состава сплава [25 – 30, 46]. Для уменьшения усадочной пористости важно осуществление подпрессовки в конечный момент прессования, для чего используют механизмы прессования с мультипликацией (усилением) давления на расплав в камере прессования машины. Принимают два варианта таких конструкций (рис. 8). В первом случае (рис. 8, а) давление прессования увеличивается благодаря дополнительному гидроцилиндру 5. Поршень 4 в момент окончания заполнения пресс-формы выдвигается в запоршневое пространство основного цилиндра 3 механизма прессования на некоторую величину l и увеличивает давление p рабочей жидкости на прессовый поршень 2 и соответственно на расплав в камере прессования 1 благодаря тому, что он поступает в полость формы.

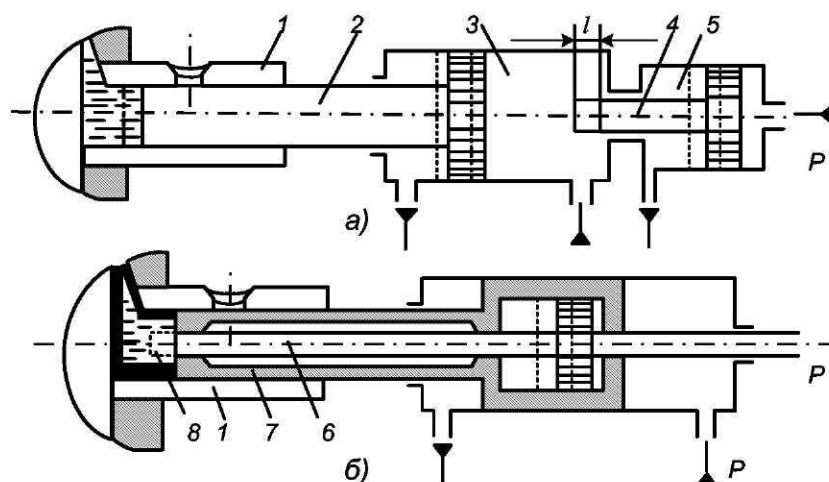


Рис. 8. Схема подпрессовки отливок при литье под давлением:
а – с мультипликацией давления, б – с двойным плунжером

Во втором случае применяют двойной прессующий поршень (рис. 8, б). До момента образования корочки 8 металла на стенках камеры прессования 1 оба плунжера перемещаются вместе, а затем после остановки плунжера 7 продолжает двигаться плунжер 6 и давление на расплав увеличивается.

Подпрессовка способствует уменьшению усадочных пор в отливке, а также сжатию газоздушных пор, уменьшению их объема, повышению плотности и герметичности отливки. Однако действие ее эффективно только в том случае, если время нарастания давления (мультипликация) меньше времени затвердевания расплава в отливке. Поэтому современные

конструкции машин для литья под давлением имеют механизмы подпрессовки с высоким быстродействием, время нарастания давления в таких механизмах составляет тысячные доли секунды.

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.

Газовый режим пресс-формы

Для получения качественной отливки необходимо, чтобы при заполнении расплавом пресс-формы воздух и газы от разложения смазочного материала удалялись из нее, так как попадая в отливку, они ухудшают ее свойства.

Суммарный объем V_{Σ} газов (рис. 9), который должен быть удален из полости пресс-формы, состоит из объема V_{κ} воздуха, находящегося в камере прессования между ее стенками, зеркалом расплава и прессовым поршнем, объема полости пресс-формы, равного объему V_0 отливки, и объема V_p паров и газов из продуктов разложения смазочного материала:

$$V_{\Sigma} = V_{\kappa} + V_0 + V_p. \quad (28)$$

Объем воздуха в камере прессования зависит от ее диаметра, дозы расплава, заливаемого в камеру, и конструкции машины.

Объем газов и воздуха, попадающих из камеры прессования в полость пресс-формы, зависит также от скорости перемещения прессующего поршня и закона изменения ее в отдельных фазах прессования. В начале движения при небольшой скорости пресс-поршня уровень расплава h соответствует положениям 1 – 4 (рис. 9, а), а при большой – положениям 5 – 7. Однако в любом из этих случаев воздух и газы могут замешиваться в расплав и затем попадать в отливку. При определенном изменении скорости перемещения (рис. 9, б) поршень постоянно догоняет волну расплава, образующуюся при трогании его с места, и воздух, и газы практически до полного заполнения литникового хода могут удаляться в пресс-форму, а из нее через систему вентиляции в атмосферу.

Максимальная площадь вентиляционных каналов, которая может быть выполнена в пресс-форме, будет равна

$$\Sigma f_B = h_B \Pi + h_B \Sigma_B, \quad (29)$$

где h_B – глубина вентиляционного канала; Π – периметр проекции отливки на плоскость разъема пресс-формы; Σ_B – суммарная ширина дополнительных вентиляционных каналов во вставках, стержнях и т. д.

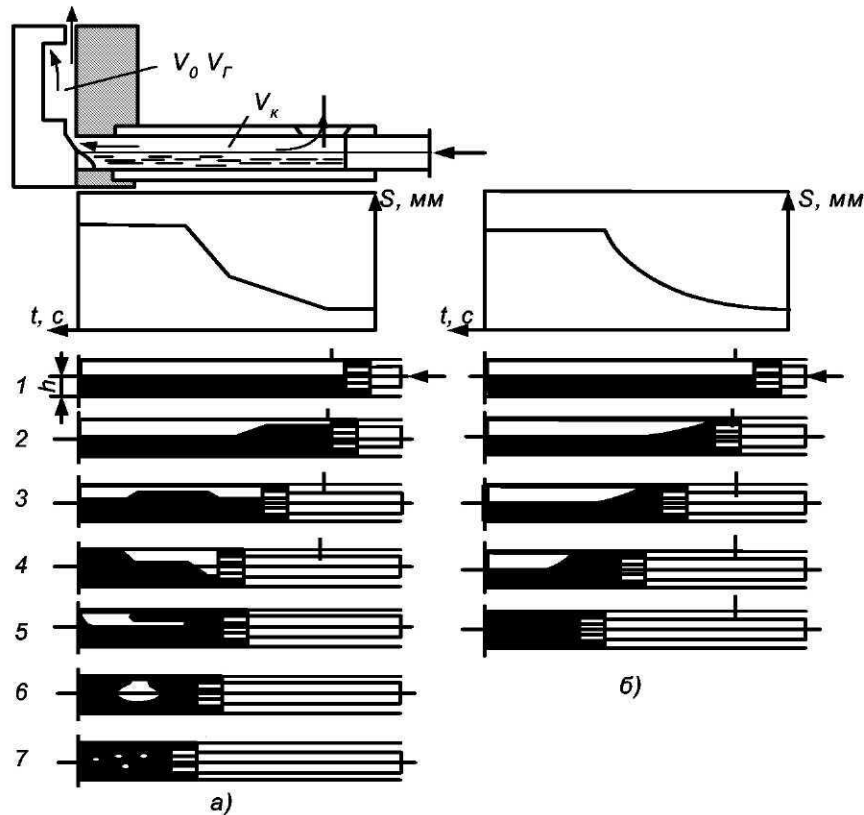


Рис. 9. Схема удаления воздуха и газов из пресс-формы и пресс-стакана

Отношение максимальной суммарной площади Σf_B вентиляционных каналов, которые могут быть выполнены в пресс-форме, к необходимой площади для полного удаления воздуха и газов из пресс-формы характеризует возможности вентиляционной системы пресс-формы и может быть названо критерием ее вентилируемости:

$$B = \Sigma f_B / f_{BH}. \quad (30)$$

Как правило, для большинства отливок и пресс-форм критерий $B < 1$. Этим и объясняется наличие газовой пористости в отливках под давлением.

Газы и воздух, вытесненные из пресс-формы и замешанные в расплав, под действием давления сжимаются. На стадии заполнения давление газа равно давлению в турбулентном или дисперсном потоке, а по окончании заполнения – давлению подпрессовки. Уравнение, описывающее кинетику нарастания давления газов и воздуха в пресс-форме в процессе заполнения, можно представить в виде:

$$p = p_{\phi}(1+Z_p)(1+B)[\tau' / (\tau_{\text{зап}} - \tau')], \quad (31)$$

где p_{ϕ} — начальное давление газа и воздуха в пресс-форме, $p_{\phi} = 0,3$ МПа; τ' — текущее время процесса заполнения; $\tau_{\text{зап}}$ — общее время заполнения пресс-формы расплавом; $Z_p = V_p/V_0$ — относительный объем газов и паров.

Зависимость изменения давления воздушно-газовой смеси в пресс-форме от относительного времени заполнения и критерия вентилируемости пресс-формы для $Z_p = 0,5$ представлена на рис. 10. Из анализа этой зависимости следует, что в момент окончания заполнения пресс-формы ($\tau'/\tau_{\text{зап}} = 0,9 - 0,95$) давление газовой смеси резко возрастает, при этом тем раньше, чем хуже вентилируется пресс-форма ($B = 0$). Существенное влияние на давление оказывает объем газов, выделяющихся из смазочного материала на поверхности пресс-формы. Как видно из рис.10 (кривые B), относительное время $\tau'/\tau_{\text{зап}}$ до резкого возрастания давления сокращается.

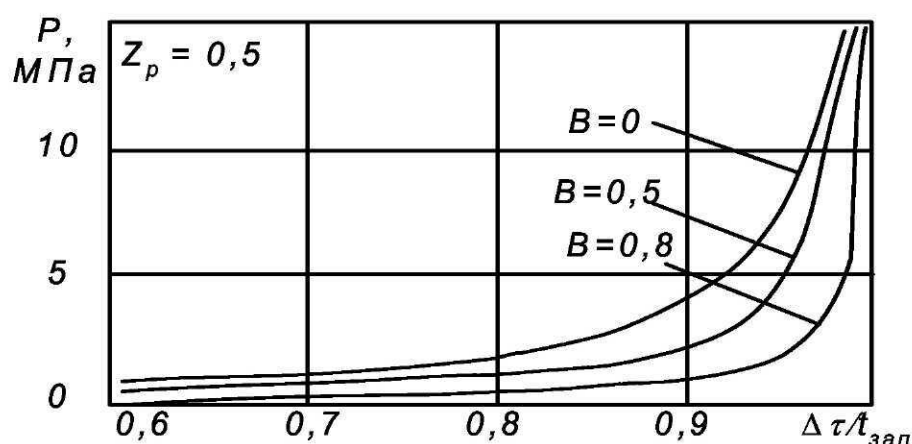


Рис. 10. Изменение давления воздуха и газов в пресс-форме при запрессовке

Зависимость давления в пресс-форме от относительного времени $\tau'/\tau_{\text{зап}}$ позволяет установить, в какой момент давление в пресс-форме уравновесит давление прессования и произойдет остановка процесса заполнения. Поэтому показатель $\tau'/\tau_{\text{зап}}$, соответствующий равенству $p = p_{\text{пр}}$, позволяет судить о степени заполненности полости пресс-формы расплавом. Под заполненностью в этом случае следует понимать отношение $V_{\text{мет}}/V_{\text{пр}}$ (где $V_{\text{мет}}$ – объем расплава в полости пресс-формы, $V_{\text{пр}}$ – объем пресс-формы). Незаполненный расплавом объем пресс-формы может образовать внутреннюю газовоздушную и усадочную пористость и внешние пороки неполного заполнения пресс-формы (недоливы).

Таким образом, зависимости на рис. 10 показывают, что использование при литье под давлением больших статических давлений прессования вызвано стремлением повысить качество поверхности, герметичность, прочность отливок путем уменьшения объема газовоздушных и усадочных пор, недоливов.

Из выражения (31) следует, что в реальных условиях при литье под давлением практически невозможно получить отливку без воздушно-газовых включений. Поэтому для уменьшения их объема стремятся сжать воздух и газы в объеме затвердевающей отливки. По-видимому, такой путь достижения высокой плотности отливок не единственный. Основной причиной, вызывающей необходимость высокого давления прессования, является плохая вентиляция пресс-формы и наличие смазочного материала на ее рабочей поверхности. Вместе с тем возможности удаления воздуха и газов, выделяемых смазочным материалом из пресс-формы, даже при ее хорошей вентиляции ограничены.

Движение расплава в пресс-форме

Характер движения расплава в пресс-форме влияет на процессы удаления воздуха и продуктов разложения смазочного материала из пресс-формы, на образование в отливках воздушной и газовой пористости.

Результаты исследований В. М. Пляцкого, А. К. Белопухова, Л. Фроммера, В. Брандта и других показали, что характер движения расплава в пресс-форме зависит от скорости его впуска, соотношения толщин питателя и стенки отливки, вязкости и поверхностного натяжения расплава, тепловых условий его взаимодействия со стенками пресс-формы, условий удаления воздуха и газов из полости. Различное сочетание этих факторов создает разнообразные по характеру режимы заполнения полости формы:

сплошным ламинарным потоком при литье с малыми скоростями впуска, сплошным турбулентным потоком при литье со средними скоростями впуска; дисперсным потоком при литье с высокими скоростями впуска.

При заполнении сплошным ламинарным потоком струя расплава со скоростью u при выходе из питателя сохраняет форму до удара о стенку пресс-формы, а затем изменяет направление движения (рис. 11). Критическая скорость, при которой сохраняется ламинарный характер движения расплава, зависит от вязкости расплава, толщины отливки приведенного размера питателя.

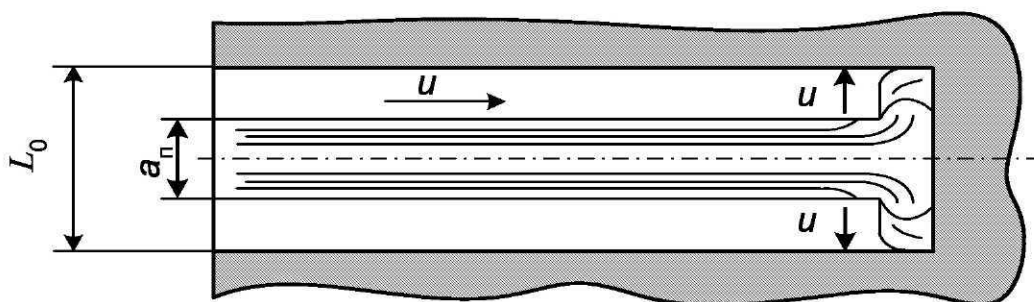


Рис. 11. Схема заполнения пресс-формы сплошным ламинарным потоком

С увеличением вязкости расплава (понижением его температуры и приближением его к твердо-жидкому состоянию) критические скорости, при которых сохраняется ламинарный характер движения, возрастают. С увеличением толщины стенки отливки критические скорости уменьшаются, т.е. при больших толщинах стенки отливки режим движения расплава приближается к турбулентному.

Сплошной ламинарный режим движения для жидкого расплава достигается при скоростях впуска до 0,3 м/с, отношениях толщины питателя $a_{п}$ к толщине L_0 отливки: $a_{п}/L_0 = 1/2 - 2/3$. Для расплава, находящегося в твердо-жидком состоянии, ламинарный режим достигается при отношении $a_{п}/L_0 = 2/3 - 3/4$ и скоростях впуска 10 – 15 м/с. При заполнении сплошным ламинарным потоком создаются условия для хорошего удаления воздуха и газов из пресс-формы, что способствует уменьшению пористости и газовых включений в отливках.

Благодаря достаточно большому отношению $a_{п}/L_0$ продолжительность затвердевания расплава в питателе незначительно отличается от длительности затвердевания отливки, что создает благоприятные условия для пе-

редачи давления на затвердевающую отливку, питания ее и уменьшения усадочной пористости. Однако сплошное ламинарное движение возможно реализовать и использовать только для отливок простой конфигурации из сплавов с широким интервалом кристаллизации при литье в твердо-жидком состоянии.

Заполнение сплошным турбулентным потоком жидких сплавов происходит при скоростях впуска $0,5 - 15$ м/с и отношении площади f_n поперечного сечения питателя к площади $F_{отл}$ поперечного сечения отливки: $f_n/F_{отл} < 1/4 - 1/2$. При заполнении сплошным турбулентным потоком в пристеночных потоках, образующихся после удара струи о стенку пресс-формы, движение становится турбулентным (рис. 12). Поступающий в полость формы расплав образует сплошной поток – гидравлический подпор. При вихревом движении расплав захватывает воздух, продукты разложения смазочного материала, которые остаются в затвердевшей отливке. Отливка, полученная в режиме сплошного турбулентного потока, часто содержит крупные газовые пузырьки диаметром 1 мм и более, снижающие плотность и герметичность отливки.

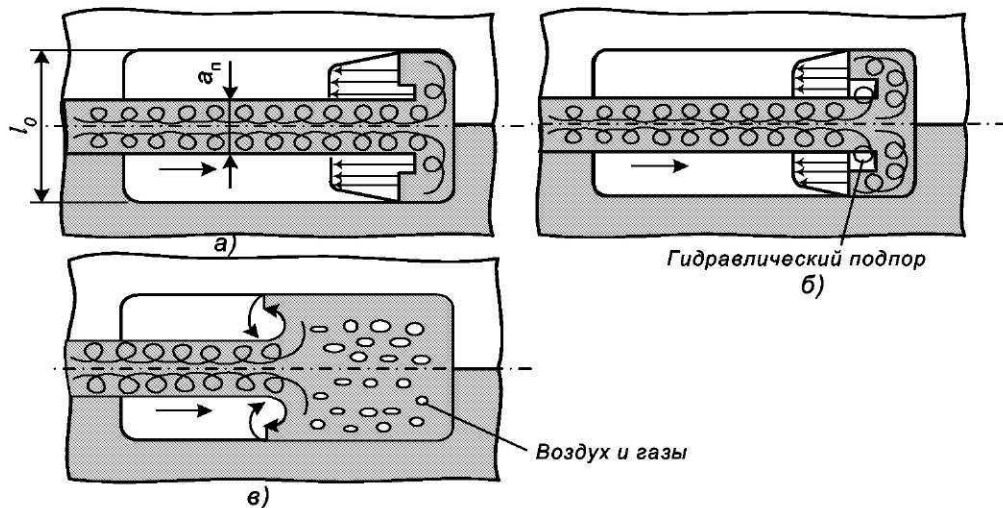


Рис. 12. Схема заполнения пресс-формы сплошным турбулентным потоком:
 а - удар струи в стенку; б - образование подпора; в - заполнение формы

Однако можно предположить, что наряду с отрицательным действием газовые и воздушные пузырьки, находящиеся в отливке при затвердевании, оказывают и положительное влияние на процесс ее формирования. Давление в пузырьках воздуха и газов при заполнении формы равно давлению в турбулентном потоке, а по окончании заполнения – статичес-

кому давлению на расплав. Из-за небольшого сечения питатель затвердевает значительно быстрее, чем отливка, и статическое давление быстро перестает действовать на затвердевающую отливку. Газы в пузырьках, заключенных внутри отливки, находясь под давлением, равным статическому давлению прессования, стремятся расширяться, давят на кристаллизующийся расплав, способствуя устранению усадочной пористости, четкому оформлению рельефа поверхности отливки.

Дисперсное заполнение происходит при скоростях впуска расплава выше 25–35 м/с и отношении $f_{\text{в}}/F_{\text{отл}} < 1/4 - 1/2$ в случае, если расплав находится только в жидком состоянии.

При ударе о стенку формы (рис. 13) струя дробится на большое число отдельных капель, образующих смесь с воздухом и продуктами разложения смазочного материала – дисперсную систему. Воздушные и газовые включения остаются в отливке, образуя мельчайшую пористость. Такая пористость в значительно меньшей степени снижает механические свойства отливки, чем образующаяся при сплошном турбулентном заполнении. При заполнении расплавом полости формы отливки сложной конфигурации рассмотренные механизмы движения расплава могут реализовываться на разных этапах заполнения и разных участках формы одновременно: на одних участках формы может образовываться дисперсный поток, на других – турбулентный, возможно образование и застойных зон, заполняющихся потоком расплава с малыми скоростями. Поэтому изложенные выше представления о моделях процесса заполнения формы, по существу, отражают лишь возможные преобладающие при том или ином режиме физические явления, их влияние на формирование качества отливки.

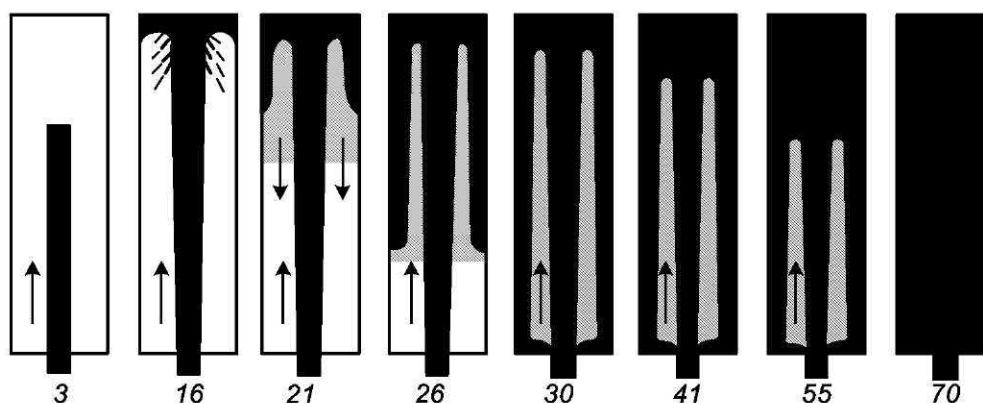


Рис.13. Схема заполнения пресс-формы дисперсным потоком (цифры – время от начала заполнения формы расплавом, мс)

Следовательно, реально управляемыми факторами могут являться лишь параметры заполнения формы расплавом и наложение давления, так как возможности регулирования теплообмена между расплавом и формой путем изменения их температуры ограничены по следующим причинам:

- при литье под давлением теплообмен между расплавом и пресс-формой происходит с интенсивностью значительно большей, чем при литье в кокиль, ввиду того что поверхность пресс-формы покрыта тонким слоем смазочного материала, имеющим небольшое термическое сопротивление. Регулирование этого термического сопротивления может осуществляться в достаточно ограниченных пределах;
- возможности изменения температуры пресс-формы перед заливкой или температуры расплава также ограничены. Повышение температуры пресс-формы удлиняет технологический цикл вследствие увеличения продолжительности остывания отливки, вызывает опасность схватывания ее с пресс-формой, поломку отливки и пресс-формы при выталкивании;
- повышение температуры расплава может увеличить усадочную пористость в отливке, привести к попаданию металла в вентиляционную систему и ухудшению условий удаления воздуха и газа из пресс-формы, увеличению пористости отливок.

Следовательно, при литье под давлением наиболее важным с точки зрения формирования отливки является этап заполнения пресс-формы расплавом. При этом наряду с тепловыми условиями формирования отливки решающее влияние на ее качество оказывают условия удаления воздуха и газов от смазочного материала из пресс-формы, характер движения расплава в пресс-форме. На основе выполненного анализа можно сделать вывод, что наиболее предпочтительным вариантом является совместное использование вакуумирования и наложения давления. Это подтверждается большим количеством существующих процессов, использующих эти факторы воздействия.

Литье под давлением с использованием вакуума осуществляют используя разные способы вакуумирования полости пресс-формы и камеры прессования, различающиеся по месту удаления воздуха и газов (непосредственно из пресс-формы, кожуха или камеры, в которую заключена пресс-форма, и т. д.), по моменту включения вакуумирования пресс-формы и камеры прессования, конструктивному исполнению системы вакуумирования [31, 47 – 52].

Например, устройство для создания вакуума в пресс-форме, установленной на машине с холодной горизонтальной камерой прессования (рис. 14), представляет собой камеру, состоящую из плиты 2, укрепленной на подвижной плите 1 машины, кожухов 3 и 4, неподвижной плиты 6, расположенной на неподвижной плите 7 машины.

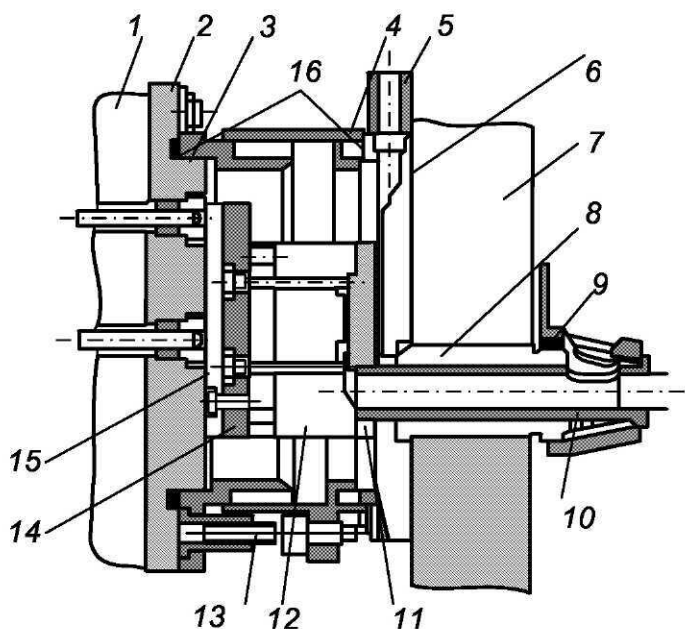


Рис. 14. Установка для литья под давлением с вакуумированием пресс-формы

Внутри кожухов 3 и 4 находится пресс-форма, состоящая из неподвижной 11 и подвижной 12 полуформ, плит толкателей 14 и 15. Камера 8 прессования каналом, проходящим между камерой 8 и сменной втулкой 10, соединяется с вакуум-проводом 5. При закрытии пресс-формы уплотнения 16 и упоры 13 обеспечивают герметичность вакуумной камеры.

После заливки расплава в камеру прессования поворотной муфтой 9 закрывают заливное окно камеры, и она с помощью электромагнитного золотника соединяется через вакуум-провод 5 с вакуумным ресивером или воздушным насосом. В камере создается требуемое разрежение, воздух и продукты разложения смазочного материала пресс-формы удаляются из ее полости через вентиляционные каналы; одновременно или с некоторой задержкой осуществляется запрессовка расплава в пресс-форму.

При этом методе пузырьки водорода удаляются как путем диффузии, которая происходит вследствие разности парциальных давлений водорода

в металле и газовой среде над его поверхностью, так и из-за всплытия газовых включений. Условия выделения газообразного водорода определяются неравенством

$$p_{H_2} > p_{\text{вак}} + g\rho_m H_m + 2\sigma_m/r, \quad (32)$$

где H_m – расстояние от места зарождения пузырька водорода до поверхности металла в тигле; σ_m – поверхностное натяжение металла; r – радиус пузырька. Анализ этого неравенства показывает, что эффект вакуумирования возрастает с уменьшением H_m и σ_m . Значение H_m зависит от глубины раздаточной печи, а σ_m – от прочности пленки окислов, которая снижается флюсами. Поэтому перед вакуумированием желательно обрабатывать сплав раскисляющим флюсом.

Таблица 1

Изменение пористости и механических свойств при рафинировании флюсом и рафинировании флюсом с последующим вакуумированием

Сплав	Пористость, %	σ_m , МПа	δ , %	НВ
Неочищенный	0,375	115	1	46
Обработанный хлористым марганцем (0,15 мас. % сплава)	0,210	137	1,2	50
Обработанный флюсом с дегазацией под вакуумом	0,112	162	1,8	52

В табл. 1 приведены данные о пористости и механических свойствах отливок из алюминиевого сплава типа AlSi7Mg0,3 [38], отражающие степень насыщения металла водородом при различных способах дегазации и показывающие, что лучшее качество отливок обеспечивает рафинирование хлористым марганцем с последующим вакуумированием. Необходимая степень разрежения над поверхностью металла, по данным [47, 52], составляет 7 – 14 кПа. При продолжительности вакуумирования 15 – 25 мин эффективность дегазации практически не зависит от начального содержания водорода в сплаве.

Соблюдение этих требований позволяет уменьшить количество воздуха, паров и газов в полости пресс-формы, снизить их противодавление при заполнении формы расплавом и благодаря этому улучшить качество отли-

вок, повысить их плотность и герметичность, прочность и относительное удлинение, в некоторых случаях осуществить термическую обработку отливок, улучшить заполняемость пресс-формы и получить крупные отливки с меньшей на 30 – 40 % толщиной стенок.

Практика использования вакуумирования полости пресс-формы при литье под давлением показала, что для получения качественных отливок и более полного использования преимуществ этого способа литья необходимо тщательно очищать расплав от неметаллических и газовых включений (рафинировать, очищать расплав); заполнять пресс-форму сплошным, а не дисперсным потоком; обеспечивать быстрое и полное удаление воздуха и газов из полости пресс-формы; осуществлять отсос воздуха и продуктов разложения смазочного материала из мест пресс-формы, где они могут скапливаться; использовать смазочные материалы с низкой газотворной способностью [31].

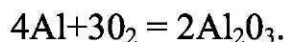
Однако при литье под давлением с использованием вакуума могут создаваться условия, при которых газы, растворенные в расплаве, вследствие понижения его температуры и увеличения разницы парциальных давлений газа в расплаве и пресс-форме, начнут выделяться из раствора, что приведет к образованию газовой пористости в отливках. Поэтому степень разрежения, при которой достигается требуемое качество отливок, зависит от химического состава расплава, количества и состава растворенных в расплаве газов, конфигурации отливки, влияющей на скорость ее охлаждения.

Кроме того, при больших степенях разрежения снижается температура испарения некоторых металлов (Zn, Mg), которые могут входить в состав заливаемого расплава или являться его основой. Процессы испарения таких составляющих также могут привести к появлению пористости и раковин в отливках. Поэтому, например, для небольших тонкостенных отливок из цинковых, алюминиевых и магниевых сплавов разрежение в пресс-форме составляет лишь 25 – 50 кПа [52].

Литье под давлением с регулированием состава газов в полости пресс-формы также выполняются различными способами. В практике получили применение процессы литья с замещением воздуха и газообразных продуктов разложения смазочного материала кислородом (O_2 -процесс), а также газами с малой плотностью, например гелием.

Кислородный процесс осуществляется следующим образом: перед заливкой расплава полость пресс-формы и камеры прессования продувается кислородом до полного вытеснения воздуха. При заполнении пресс-фор-

мы расплавом кислород вступает в реакцию окисления с частицами расплава, заполняющими полость пресс-формы. Реакция окисления расплава протекает с высокой скоростью, благодаря чему большая часть кислорода в объеме рабочей полости расходуется на окисление расплава, а в форме образуется вакуум:



Образующиеся частицы окисла Al_2O_3 находятся в мелкодисперсном состоянии, и их удается обнаружить только при увеличении свыше 40 тыс. раз в электронном микроскопе. Теоретически содержание окислов в отливке, полученной по кислородному процессу, может в 4,5 раза превышать их количество при обычном литье под давлением, однако они не ухудшают механических свойств и обрабатываемости отливок. Вместе с тем газосодержание отливок и пористость в них значительно уменьшаются. Например, в отливках из алюминиевых сплавов содержание газов при кислородном процессе снижается до $0,5 - 1 \text{ см}^3/100 \text{ г}$. Однако при использовании кислородного процесса исключается использование смазочных материалов, выделяющих при разложении продукты, способные взаимодействовать с кислородом. Смазочные материалы пресс-формы для кислородного процесса должны быть негасительными. Иначе из-за взаимодействия кислорода с продуктами разложения смазочного материала в полости формы могут образоваться CO , CO_2 , SO_2 , H_2O и другие газы и пары, и эффективность процесса снизится. Это ограничивает применение способа для отливок сложных «по съему», т. е. с большим числом стержней, выполняющих глубокие отверстия большой протяженности и т. д. [53].

По сравнению с вакуумированием полости пресс-формы кислородный процесс обладает некоторыми преимуществами: производительность процесса литья практически не снижается, форму не нужно заключать в кожух, что позволяет использовать достаточно сложные пресс-формы с дополнительными механизмами для извлечения стержней и т. д. Однако при использовании кислорода повышается пожароопасность в цехе и требуется тщательное соблюдение правил техники безопасности и пожарной охраны.

Гелиевый процесс осуществляется по схеме, близкой к кислородному процессу. Перед заливкой расплава полость камеры прессования и пресс-формы заполняется гелием так, чтобы весь воздух был вытеснен и замещен гелием. Поскольку гелий – газ, намного легче воздуха, имеет мень-

шую молекулярную массу ($M = 4,003$), он легко вытекает из пресс-формы. Чтобы гелий не мог быть замещен воздухом, он подается в пресс-форму постоянно. При запрессовке гелий легко вытекает из пресс-формы через каналы вентиляционной системы. Благодаря этому противодействие газа в пресс-форме значительно меньше, газ не попадает в отливку, количество газовых пор резко уменьшается и плотность ее возрастает.

Литье вакуумным всасыванием

Сущность процесса литья вакуумным всасыванием состоит в том, что расплав под действием разрежения, создаваемого в полости формы, заполняет ее и затвердевает, образуя отливку. Изменением разности между атмосферным давлением и давлением в полости формы можно регулировать скорость заполнения формы расплавом. Вакуумирование полости форм при заливке позволяет заполнять формы тонкостенных отливок с толщиной стенки 1 – 1,5 мм, исключить попадание воздуха в расплав, повысить точность, герметичность и механические свойства отливок [54].

В производстве используют установки двух основных разновидностей.

Установки первого типа (рис. 15) имеют две камеры: нижнюю – *а* и верхнюю – *б*. Нижняя камера *а* представляет собой раздаточную печь с электрическим или газовым обогревом, в которой располагается тигель 1 с расплавом. Верхняя камера *б* расположена на крышке 2 нижней камеры; в крышке установлен металлопровод 3. Форму 4 устанавливают и закрепляют в камере *б* так, чтобы литник 5 соединялся с металлопроводом 3. Верхняя камера *б* герметически соединяется прижимами 6 и крышкой 2.

Полость верхней камеры *б* через вакуум-провод 7 соединена с ресивером, в котором насосом создается разрежение, регулируемое системой управления. В начальный момент клапан управления открывается, в камере *б* создается разрежение, и расплав вследствие разницы давлений в камерах *а* (атмосферное) и *б* (менее атмосферного) по металлопроводу 3 поднимается и заполняет полость формы. После затвердевания отливки клапан системы управления соединяет полость камеры *б* с атмосферой, давление в верхней и нижней камерах становится одинаковым, а остатки незатверде-

шего расплава сливаются из металлопровода 3 в тигель 1. Камера б снимается, форма 4 с отливкой извлекается, и цикл может повторяться.

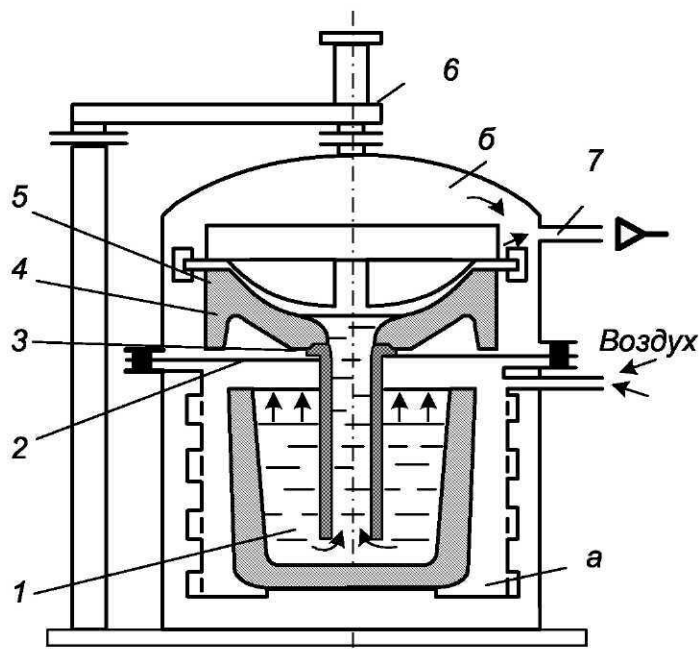


Рис. 15. Установка для литья вакуумным всасыванием фасонных отливок

Анализ пневмогидравлических процессов, происходящих при работе установки, показывает, что природа их и закономерности протекания такие же, как при литье под низким давлением. В рассматриваемом случае давление, под которым расплав заполняет полость формы, равно разнице давлений между атмосферным $P_{\text{атм}}$ и остаточным $P_{\text{ост}}$ в камере б установки: $A_p = P_{\text{атм}} - P_{\text{ост}}$. Однако как и при литье под низким давлением скорости движения расплава в металлопроводе и полости формы зависят от скорости изменения разницы давлений A_p в процессе заполнения, которая также определяется сочетанием многочисленных конструктивных и пневматических параметров системы.

Установки такого типа используют обычно для улучшения заполнения форм сложных тонкостенных фасонных отливок из алюминиевых и магниевых сплавов с толщиной стенки 2 – 2,5 мм, а иногда и 1 – 1,5 мм.

При литье вакуумным всасыванием улучшаются механические свойства отливок. Например, предел прочности отливок из алюминиевого сплава АЛ9 возрастает на 5 – 10 %, а относительное удлинение на 30 % по срав-

нению с литьем в кокиль. Это объясняется лучшими условиями питания отливки через металлопровод, чем из прибылей.

Установки первого типа используют также для изготовления отливок по следующим вариантам:

– вначале создается разрежение в камере *б* установки, а затем форма заполняется расплавом, отливки затвердевают под низким давлением, создаваемым в камере *а*;

– заполнение формы осуществляется по первому варианту, а затвердевание отливки происходит под всесторонним давлением воздуха в камере *б* установки.

Установки второго типа используют для отливки втулок, слитков и заготовок простой конфигурации в водоохлаждаемые кристаллизаторы. Носок металлического водоохлаждаемого кристаллизатора 1 (рис. 16) погружается в расплав, находящийся в тигле 2 раздаточной печи. Рабочая полость кристаллизатора, образующая отливку, соединяется с вакуумным ресивером 3. Разрежение в системе создается вакуум-насосом 6 и регулируется натекателем 5. Поворотом распределительного крана 4 рабочая полость кристаллизатора соединяется с вакуумным ресивером 3. В полости кристаллизатора создается разрежение, и расплав всасывается внутрь кристаллизатора, поднимаясь на высоту, пропорциональную разрежению $h_{рт}$ и обратно пропорциональную его плотности ρ , $H = h_{рт} \rho_{рт} / \rho$, (где $\rho_{рт}$ – плотность ртути). После затвердевания отливки носок кристаллизатора извлекают из ванны расплава, поворотом крана 4 рабочую полость соединяют с атмосферой и отливка выпадает из кристаллизатора в приемный короб.

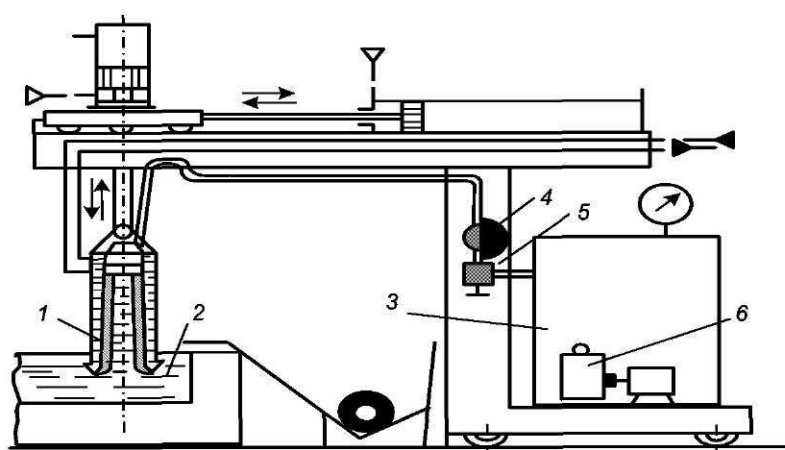


Рис. 16. Установка для литья вакуумным всасыванием втулок, гильз, слитков

Форма может заполняться расплавом с требуемой скоростью, плавно, без разбрызгивания, сплошным фронтом; расплав, заполнивший форму, затвердевает в условиях вакуума; газы, содержащиеся в расплаве, могут из него выделяться, благодаря чему создаются условия для получения отливок без газовых раковин и пористости; одновременно под действием давления воздуха на зеркало расплава последний постоянно питает отливку, в результате чего отливка может быть получена плотной, без усадочных дефектов.

Обычно при литье слитков вакуумным всасыванием расплав засасывают в тонкостенный металлический водоохлаждаемый кристаллизатор, благодаря чему отливка затвердевает с высокой скоростью, что способствует устранению ликвации в отливках из сплавов, склонных к ликвационным явлениям.

Способом, рассмотренным выше, можно получать пустотелые заготовки типа втулок без стержней. В этом случае после всасывания расплава в кристаллизатор и намораживания на внутренних стенках кристаллизатора корочки твердого металла заданной толщины вакуум отключается и незатвердевший расплав сливается обратно в тигель. Таким способом получают плотные заготовки втулок без газовых и усадочных раковин и пористости. Однако внутренняя поверхность втулок бывает волнистой из-за неравномерного затвердевания. Это вызывает необходимость увеличения припуска на обработку резанием внутренней поверхности втулки. Для уменьшения припуска можно отливать такие заготовки с применением стержня, устанавливаемого внутрь кристаллизатора.

Способ позволяет получать отливки из легких цветных, медных сплавов, чугуна и стали. Наиболее часто этот способ используют для литья заготовок втулок, вкладышей, подшипников скольжения из дефицитных и дорогостоящих медных сплавов. При этом наиболее полно проявляются основные преимущества данного способа: спокойное заполнение формы расплавом с регулируемой скоростью, что позволяет устранить дефекты в отливках, связанные с заполнением формы; сокращение расхода металла вследствие устранения литников и прибылей; автоматизация процесса заполнения формы, что позволяет осуществить комплексную автоматизацию процесса получения отливок.

Можно сделать вывод, что реально управляемыми факторами могут являться лишь параметры заполнения формы расплавом и наложение дав-

ления, так как возможности регулирования теплообмена между расплавом и формой путем изменения их температуры ограничены.

При литье под давлением наиболее важными с точки зрения формирования отливки являются:

- этап заполнения пресс-формы расплавом. При этом наряду с тепловыми условиями формирования отливки решающее влияние на ее качество оказывают условия удаления воздуха и газов от смазочного материала из пресс-формы, характер движения расплава в пресс-форме.

- этап наложения давления на кристаллизующийся металл. При этом решающее влияние оказывает закон его наложения.

На основе проведенного анализа также можно сделать вывод, что наиболее предпочтительный вариант – наложение давления по соответствующему закону возможно с предварительным вакуумированием. Однако при этом необходимо представлять себе механизм влияния давления для обоснования и разработки закона его наложения.

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 значений введена специальная величина – степень метастабильности, характеризующая величину переохлаждения, на которую можно изменить равновесные ликвидус и солидус. Степень переохлаждения является функцией скорости охлаждения.

Кристаллизация в отсутствие переохлаждения протекает по другому механизму. В результате уменьшения числа центров кристаллизации формирующиеся дендритные ячейки вырастают до больших размеров. Внутри дендритных ячеек развивается ликвация, вследствие ограниченного притока металла извне образуются поры и рыхлота в межосных пространствах. На границах зерен оседают газовые, интерметаллидные, неметаллические включения. В массивных узлах могут образоваться усадочные раковины.

Надо отметить, что искусство литья позволяет управлять процессами формирования отливок, но возможности управления скоростью кристаллизации внутри массивных стенок отливок достаточно ограниченные.

Таким образом, задача состоит в том, чтобы уменьшение скорости охлаждения по мере увеличения толщины закристаллизовавшейся корки компенсировать внешним воздействием – наложением давления.

Поскольку температура кристаллизации с увеличением давления повышается, а по мере продвижения фронта кристаллизации и увеличения толщины затвердевшей корки скорость охлаждения снижается, возникает необходимость на разных этапах формирования отливки величину внутреннего давления на металл приводить в соответствие со скоростью охлаждения на фронте кристаллизации, т.е. накладывать давление по программе, составленной с учетом скорости кристаллизации.

1.4. Автоматизация процессов литья под давлением

Автоматизация обеспечивает стабильность качества, повышение эффективности производства и является нижним уровнем АСУ ТП [55 – 57]. Сущность задачи автоматизации процессов литья состоит в управлении технологическими параметрами процесса, определяющими качество. Для решения этой задачи необходимо располагать надежной и достоверной информацией о закономерностях влияния параметров технологического процесса на качество отливок, т. е. должны быть известны зависимости вида $ПК = f(ТП)$, где ПК – показатели качества отливки (масса, точность, герметичность, внешние дефекты, дефекты объема и т. д.); ТП – технологические параметры (температура заливки расплава, температура пресс-формы, скорость прессования, давление прессования и т. д.). Для получения таких зависимостей необходимо контролировать качество отливок и параметры технологического процесса [58 – 61].

Требования к качеству отливок определяются техническими условиями. Контроль качества отливок осуществляется на нескольких этапах: внешним осмотром после извлечения их из пресс-формы и после отделения литников и облоя; после очистки поверхности, если таковая предусмотрена технологическим процессом; после обработки резанием перед передачей на последующие операции [62, 63]. Качество отливок проверяют контролеры с помощью контрольно-измерительных приборов, приспособлений, устройств. Полученная в результате контроля информация о качестве отливок является основанием для суждения о правильности назначенных параметров технологического процесса либо о необходимости изменения того или иного параметра для улучшения качества, если пока-

затель качества не соответствует уровню технических требований. В последнем случае оператор по указанию технолога изменяет параметры процесса, например, скорость прессования, температуру заливаемого сплава или температуру пресс-формы [64].

Для контроля параметров технологического процесса, определяющих показатели качества отливки, машины литья под давлением оснащают системой датчиков. Из обзора, представленного выше, видно, что наиболее существенными параметрами технологического процесса, определяющими качество отливок при литье под давлением, являются: температура и доза заливаемого сплава, температура пресс-формы, усилие запираения, скорость прессования, давление прессования и скорость нарастания давления при подпрессовке, продолжительность выдержки отливки в пресс-форме, усилие съема отливки или извлечения из нее стержней, темп работы, зависящий от длительности основных и вспомогательных операций [65 – 69].

Температуру заливаемого сплава контролируют термопарами в тигле автоматического дозирующего устройства или раздаточной печи [68]. Доза заливаемого сплава определяется точностью автоматического дозатора [70]. Усилие запираения контролируют механическими или индуктивными датчиками, измеряющими деформацию колонн машины на участке мерной длины. Такие датчики позволяют осуществить блокировку механизмов прессования, если усилие запираения не соответствует требуемому [71].

Для измерения скорости прессования применяют датчики различных конструкций, чаще всего реохордные. Используют датчики и приборы двух типов: измеряющие среднюю за цикл скорость перемещения прессового поршня; позволяющие записывать изменения пути или скорости во времени за цикл прессования. Приборы первой группы дают возможность оператору контролировать соответствующий параметр и, сопоставляя его с эталоном, регулировать механизм прессования машины. Для автоматического регулирования необходимо измерять перемещение и скорость поршня, т. е. получать графики: путь – время и скорость – время. Для этого применяют комбинированные приборы, записывающие сразу два графика. График путь – время используют для оперативного контроля скорости прессования по эталонному графику; сравнивая оба графика, оператор может регулировать работу узла прессования. График скорость – время позволяет установить взаимосвязь между гидравлическими сопротивлениями в пресс-форме и динамическими характеристиками прессующего узла [72].

Для измерения давления и усилия прессования используют манометры и первичные преобразователи индуктивные, тензометрические и электрические. С их помощью на осциллографах записывают изменения давления рабочей жидкости в цилиндре прессования. Обычно такая запись производится совместно с записями скорости и перемещения прессующего поршня. Наибольшее применение находят индуктивные преобразователи давления. Они достаточно надежны и малоинерционны [73].

Для контроля температуры пресс-формы используют переносные и стационарные преобразователи. Переносные преобразователи – это контактные термодатчики и термометры, используемые для периодического контроля температуры. Они просты, но точность их показаний невелика и зависит от навыка оператора. Стационарные преобразователи – это термодатчики, вмонтированные в стенку пресс-формы [74].

Тепловые условия формирования отливки зависят не только от температуры пресс-формы и заливаемого сплава, но и от темпа работы – числа литейных циклов в единицу времени. Отклонения от заданного темпа работы приводят к нарушению тепловых условий формирования отливки и ухудшению ее качества. Темп работы машин контролируют с помощью тех же приборов, что и для контроля скорости, температуры или давления прессования [75].

Первичные преобразователи и приборы для контроля параметров технологического процесса объединяют в измерительную систему, которой оснащают машины для литья под давлением [76].

Стенды для контроля технологических параметров литья под давлением позволяют контролировать важнейшие параметры:

- скорость прессующего поршня и подвижных частей машины,
- давление рабочей жидкости в гидросистеме машины,
- время нарастания давления подпрессовки,
- усилия прессования и выталкивания отливки,
- усилие запирающего устройства,
- температуру пресс-формы,
- длительность выдержки отливки в пресс-форме.

Такие стенды могут иметь выход на управляющую ЭВМ в составе автоматизированного литейного комплекса.

Системы контроля параметров технологического процесса позволяют управлять качеством отливок на основе сопоставления результатов конт-

роля их качества и фактических параметров технологического процесса, полученных с помощью систем контроля [77].

Управление качеством отливок

В зависимости от конкретных условий производства управление качеством отливок осуществляется на трех различных уровнях [38, 78].

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 (рис. 17, I). Обычно это регуляторы скорости прессования и подпрессовки, продолжительности выдержки отливки в форме, температуры заливаемого сплава, пресс-формы и пресс-камеры (P_1-P_n).

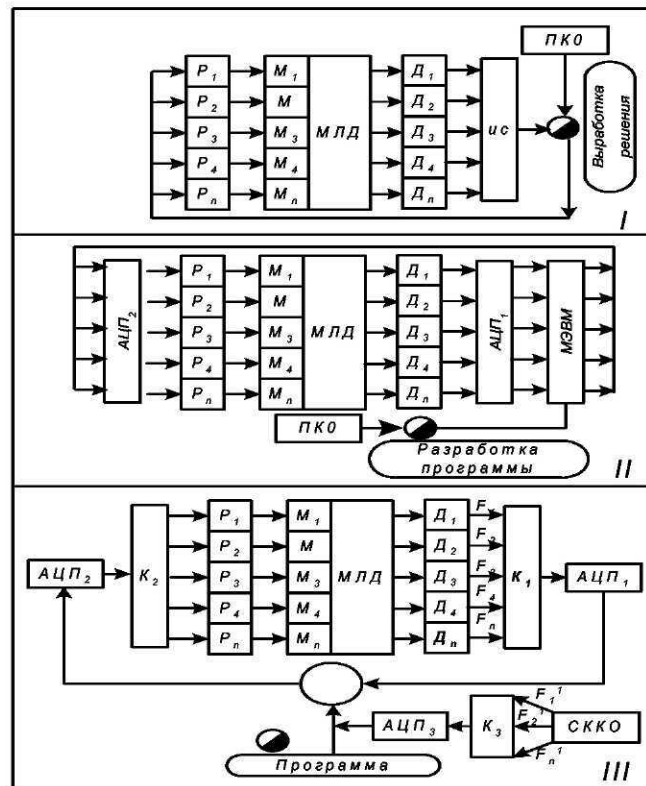


Рис. 17. Схемы автоматизации управления технологическими процессами литья под давлением

На основе заключения о показателях качества отливки (ПКО) оператор вырабатывает решение о необходимости изменения того или иного параметра технологического процесса регулирует работу соответствующих ме-

ханизмов M_1-M_n литейной машины или комплекса. Такой уровень управления качеством отливок наиболее приемлем для условий серийного многономенклатурного производства.

На втором уровне (рис. 17, II) литейный комплекс оборудуется кроме системы контроля параметров технологического процесса микроЭВМ, с помощью которых управление регуляторами механизмов машины осуществляется с целью оптимизации параметров технологического процесса по их отклонению от заданных.

В этом случае на основе статистической обработки результатов контроля качества отливок разрабатывают математические модели связи показателей качества и параметров технологического процесса. На основе таких математических моделей разрабатывают управляющие программы. МикроЭВМ, получая информацию 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 АЦП₂ передает управляющий сигнал на регуляторы P_1, P_2, \dots, P_n исполнительных механизмов машины, например на регулятор скорости механизма прессования машины. Такой уровень автоматизации управления наиболее приемлем для условий крупносерийного и массового производства.

На третьем, высшем уровне (рис. 17, III) 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 оптимальные значения регулируемых параметров и через систему обратной связи, включающую коммутатор K_2 и АЦП₂, передает управляющий сигнал на систему регуляторов $P_1 - P_n$, воздействуя соответствующим образом на исполнительные механизмы литейного комплекса.

Однако системы первого уровня, несмотря на их простоту, имеют весьма значительный недостаток, в них отсутствует обратная связь, обеспечивающая корректировку параметров в реальном режиме времени.

В то же время создание систем второго и третьего уровней требует решения ряда научно-технических проблем. Первая проблема заключается в создании высоконадежных и быстродействующих механизмов литейных комплексов: механизмов запирания, прессования, вспомогательных устройств, устройств управления исполнительными механизмами машины, приборов контроля параметров технологического процесса. Вторая проблема состоит в разработке быстродействующих и надежных систем автоматического контроля качества отливок.

Автоматизация управления технологическим процессом литья под давлением при использовании систем второго и третьего уровней требует создания математических моделей процесса, связывающих показатели качества отливок и параметры технологического процесса.

1.5. Управление формированием структуры отливок

Известно, что структура отливок определяется скоростью охлаждения металла на фронте кристаллизации [2, 12, 13, 16, 19, 24], и если при литье в песчано-глинистые формы формирование неблагоприятной структуры отливок связано с относительно медленным охлаждением, то при использовании металлических форм более быстрое охлаждение, хотя и благоприятствует повышению плотности и прочности, как правило приводит к образованию разнородной структуры. В частности, при литье чугуна происходит отбел поверхностного слоя, исправляют такую структуру не управлением тепловым режимом литья, а соответствующей термической обработкой.

Возможности регулирования интенсивности теплообмена между отливкой обычно связывают с теплофизическими свойствами материалов форм. И хотя теплопроводность медных кристаллизаторов, например, на несколько порядков выше теплопроводности песчано-глинистых форм, после заливки металла в форму процесс теплообмена выходит из-под контроля; поверхностные слои отливки быстро охлаждаются, чему не в малой степени способствует аккумуляция тепла поверхностными слоями формы. По мере выравнивания температур по поверхности контакта плотность теплового потока резко снижается. Поэтому уже на стадии проектирования от-

ливка принимает конфигурацию, форму и размеры, исключаящие разностенность, резкие переходы от одного сечения к другому, пересечения массивных толстых стенок и т.д. При всех известных преимуществах литые заготовки могут быть получены без брака и дефектов только при условии выполнения специфических требований и значительных ограничений. Более или менее однородную структуру можно получить лишь в относительно тонких сечениях и ни о каком управлении формированием структуры в отливках с толщиной стенки более 30...40 мм не может быть и речи.

Проблема обеспечения равномерной плотной структуры особенно актуальна при производстве корпусных деталей, в частности деталей пневмогидроарматуры из стали, алюминиевых и медных сплавов, когда толщина стенки достигает 80 мм и более. За счет исправления грубой литейной структуры сплава АК8 путем наложения давления на кристаллизующийся металл, как показано в работе [79], получены корпуса пневморедукторов, герметичность которых под пневматическим давлением более 40 МПа оказалась выше, чем у серийных из того же сплава в деформированном состоянии. Подробно формирование структуры отливок изучено и представлено в работе [80]. Характерно, что при наложении давления изнутри из-под корки закристаллизовавшегося металла структура формируется в результате запрессовывания дополнительных объемов металла на компенсацию усадки и дополнительной пластической опрессовки литых кристаллов, сформировавшихся до наложения давления. Такая структура не имеет усадочных дефектов, характеризуется, как было сказано, высокой герметичностью, но она состоит из отдельных зон – фрагментов, отличающихся по виду и характеру строения.

На данном этапе исследований, можно считать, была решена проблема уплотнения кристаллизовавшегося металла за счет наложения давления.

На следующем этапе было обращено внимание на то, что такие параметры процесса, как скорость охлаждения и величина накладываемого давления тесно между собой связаны. Природа этой взаимосвязи может быть представлена следующим образом. Известно, что с увеличением скорости охлаждения степень переохлаждения как разность между теоретической равновесной температурой кристаллизации и фактической температурой образования кристаллов увеличивается [81, 82]. В то же время с повышением давления, как следует из работ [29, 30, 46, 54, 82, 83], температура кристаллизации повышается, что с термодинамической точки зрения вытекает из уравнения Клаузиуса-Клапейрона [84, 85]. Отсюда сам собой нап-

рашивается вывод, что ту или иную степень переохлаждения можно создать или скоростью охлаждения, или наложением давления соответствующей величины, но в то же время можно снижение скорости охлаждения, в частности, на удалении от поверхности отливки, компенсировать наложением давления. А так как возможности регулирования давления в достаточно широких пределах практически ничем не ограничены, давление приобретает смысл управляемого параметра в технологии литья, с помощью которого можно целенаправленно повлиять на формирование однородной структуры в более массивных по сравнению с обычными отливками сечениях, или формировать разные структуры у поверхности и в сердцевине.

Если этот этап освоения и использования давления назвать формированием структуры путем методического программно-корректируемого наложения давления, то следующий за ним этап использования давления для фиксации состояния металла при температуре, на 30...50 К превышающей равновесный ликвидус, путем сближения атомов на расстояния, при которых условия их взаимодействия, диффузии, расслоения, взаимного скольжения существенным образом изменяются, можно было бы по аналогии с термической обработкой – закалкой на мартенсит – назвать формированием структуры под давлением из сильно неравновесных состояний.

Принимая во внимание кластерную теорию строения расплавленных металлов [86–89], можно представить, что под влиянием давления межкластерные пространства будут сжиматься. Если эти пространства – пустоты, а расплав достаточно подвижен, то для захлопывания указанных пустот больших усилий не требуется. В то же время молекулы газов, непременно присутствующие в расплавах, с высокой вероятностью могут претендовать на эти пустоты, и тогда сопротивление расплава наложению давления на этапе сжатия пустот будет зависеть от поведения газов. Выполненные расчеты [90] показывают, что в этом случае наложения высокого давления не требуется. Представления о кластерах и межкластерных пространствах тем более убедительны, что находят реальное подтверждение в таких явлениях, как усадка и изменение растворимости газов при переходе из жидкого состояния в твердое, наследственность, жидкотекучесть [91–93].

Вместе с тем использование давления как дополнительного технологического фактора заставляет и эти представления существенно расширить. Дело в том, что кластерная теория, являясь в основе своей вероятностно-статистической теорией, исходит из предположения о равномерном рас-

пределении компонентов в объеме расплава или, по крайней мере, исключает возможность подготовки к фазовому превращению путем перераспределения компонентов соответственно их концентрации в новых фазах.

По утверждению В.К. Григоровича [94], основанному на анализе кривых зависимости теплоемкости от температуры, процессы подготовки к фазовому превращению протекают в широком интервале температур и начинаются задолго до самого превращения.

Заостряя внимание на перераспределении компонентов расплава на значительном удалении от температуры фазового равновесия, уместно предположить о продолжении линий фазового равновесия на диаграммах состояния выше ликвидуса [89]. Тогда, возможно, накладываемое давление влияет на механизм и кинетику перераспределения компонентов. И если идти дальше, то можно поставить вопрос о такой величине давления, накладываемого на жидкий металл, когда атомы сближены на расстояние, при котором диффузия по пустотам и вакансиям затруднительна, а спрессованный таким образом расплав от твердого металла отличается отсутствием кристаллического строения. Однако технологически зафиксировать такое квазитвердое состояние очень трудно. И только тщательное изучение поведения расплавов под давлением в адиабатических условиях или (и) в условиях контролируемого охлаждения может пролить свет на исключительно сложный феномен природы, связанный с переходом из бесструктурного жидкого в твердое кристаллическое состояние. Несостоятельность существующих теорий жидкого состояния, кристаллизации, наследственности, затвердевания, ликвиции и других как раз в том и состоит, что они не связаны друг с другом, а пренебрежение взаимным влиянием неизбежно приводит к ошибкам. В этом случае теория не выполняет возложенных на нее функций. Необходимость существенного расширения представлений о поведении расплавов в условиях наложения давления обусловлена также тем, что и в развитии смежных наук наметились качественные изменения.

Нельзя оставить без внимания современные теории сложных систем [96–100]. Возможно, что именно с позиций представлений о сильно неравновесных состояниях, о формировании диссипативных структур можно значительно дальше продвинуться в понимании сложных явлений. И если термодинамический анализ является инструментом исследования металлических систем на микроскопическом уровне, то ключевые положения физики неравновесных состояний нацелены на анализ составляющих энергии в однородной атомной среде. Очень важными являются положения о том,

что сумма кинетической, репульсивной, аттрактивной, колебательной, спиновой и поверхностной составляющих энергии равна нулю, причем значение каждой из составляющих определяется не только расстоянием между атомами, но и характером их движения.

В то время как тепловая теория литья оперирует исключительно законом сохранения энергии, физика неравновесных состояний обращается также к законам сохранения импульса и момента импульса [101], что может быть использовано при разработке уравнения состояния расплава в условиях наложения давления.

Теория сложных систем как оперирующая наиболее общими законами фазовых переходов применительно к обоснованию законов, алгоритмов и управляющих программ наложения давления может быть использована не только в целях описания и объяснения установленных зависимостей, но и для синтеза принципиально новых процессов.

Правило литейщиков «Плавь горячо, лей холодно», о котором упоминает Г.Ф. Баландин [13], безусловно, справедливо для обычных процессов гравитационного литья. Это же правило используется при литье под давлением, когда расплав в камеру прессования подают в двухфазном (кашеобразном) состоянии. Но физика неравновесных состояний указывает на то, что вблизи температуры фазового равновесия система «слепа», так как имеет весьма ограниченное число вариантов и сценариев фазового превращения [99].

Так, в стали У8 после нагрева до аустенитного состояния в условиях медленного охлаждения будет формироваться структура с характерной морфологией феррита и цементита. Увеличение скорости охлаждения обеспечивает сначала повышение твердости за счет диспергирования фаз, а при достижении критической скорости охлаждения фазовое превращение протекает по бездиффузионному (мартенситному) механизму. При этом температуру начала мартенситного превращения вправе рассматривать как точку бифуркации (раздвоения). Пластическое деформирование металла в аустенитном состоянии привносит в это превращение дополнительные возможности для повышения прочности и твердости. Однако это пример вторичной кристаллизации. Значительно большими ресурсами располагает кристаллизация из жидкого состояния. Кристаллизация в неравновесных условиях, например в условиях быстрого охлаждения, обычно рассматри-

вается с чисто металловедческих позиций – формирование структуры связывают с числом центров кристаллизации и степенью переохлаждения по Тамману [102].

Давление, если его накладывать на жидкий металл при температуре выше равновесного ликвидуса, может быть использовано для перевода расплава в новое состояние. В данном случае давление выступает в качестве термодинамического параметра, который так же, как температура определяет состав фаз в равновесных условиях или влияет на фазовое превращение при изменении скорости наложения давления.

Идея управления формированием структуры отливок возможно еще достаточно длительное время оставалась неостребованной, если бы, по меньшей мере, не два обстоятельства, которые настоятельно подталкивают к конкретным действиям.

Первое из них заключается в том, что на рынке металлопродукции появились прецизионные сплавы для спецтехники, медицины, приборостроения, которые по традиционной технологии, включающей выплавку, получение слитка, прокатку, ковку, штамповку, механическую обработку, получить невозможно. Причина здесь в том, что в структуре слитков наряду с явными дефектами – ликвацией, усадочной пористостью и т.д. обнаруживаются грубые столбчатые кристаллы. Такой слиток в процессековки или прокатки рассыпается или расслаивается. Очевидно, что в отношении таких сплавов единственным выходом является формирование бездефектной плотной и однородной структуры непосредственно в процессе кристаллизации. Выполненные исследования [103] показали, что процесс литья с программным наложением давления обеспечивает формирование структуры, отвечающей требованиям *Заказчика*, без дополнительной обработки методами пластического деформирования. Но эта задача решена по отношению к изделиям сравнительно большой массы, для которых неоднородность состава и свойств в объемах, соизмеримых с объемом дендритной ячейки, не имеет принципиального значения. Но если из полученной заготовки предполагается вытягивать волокна диаметром 0,1...0,5 мм, то не трудно представить, что присутствие в структуре даже незначительных сегрегаций неметаллических включений может привести к целому ряду нежелательных последствий. Поэтому вопрос о формировании структур, в которых распределение компонентов, газовых и неметаллических включений такое же равномерное, как в перегретом жидком металле, можно считать назревшим, но реализация его представляется проблематичной,

так как при температурах, близких к солидусу, могут активно развиваться процессы диффузии, нарушающие то распределение, которое было при наложении давления. Сложной и пока неразрешимой проблемой здесь остается сжатие кристаллической решетки до таких пределов, при которых можно было бы исключить диффузию компонентов по дефектам структуры. А вот добиться более равномерного распределения интерметаллидов, неметаллических и газовых включений за счет сжатия жидкого металла при температуре t^p , которая, например на 30...50 К, превышает равновесный ликвидус, задача вполне конкретная и технологически достаточно легко выполняемая. И если речь идет о приближении структуры и свойств отливок к лучшим показателям пластически деформированных заготовок, то актуальность нового процесса распространяется и на массовые изделия из других сплавов.

Второе обстоятельство связано с тем, что в физике неравновесных фазовых превращений при описании «динамического хаоса» оказалось возможным перейти от гидродинамических моделей к дифференциальным уравнениям [97, 98]. Это открывает возможность при создании систем автоматизированного управления формированием структуры в условиях программно-корректируемого наложения давления для описания поведения расплавов вблизи точки фазового превращения и оптимизации процесса в целом использовать сравнительно простые математические модели.

Представления о расплавленном металле как о сложной самоорганизующейся системе, в которой наложение давления, по предположениям, основанным на кластерной теории строения расплавов, сближение атомов или их группировок позволит направить подготовительные процессы разделительной диффузии и изменения концентраций и масс реагирующих фаз в другое русло, могут быть положены в основу при разработке новых технологических процессов производства металлопродукции.

Как один из возможных вариантов на рис. 18 схематически представлен в виде блок-схемы технологический процесс с соответствующей системой управления. Необходимые для его осуществления процедуры классифицированы по технологическому (Т), расчетному (Р) и проектировочному (Пр) признакам.

Основные параметры процесса могут быть рассчитаны с использованием справочных и литературных данных, а также результатов экспериментальных исследований. Так, для расчета потерь тепла во время заполнения формы могут быть использованы критериальные уравнения теории подо-

бия [105]. Для расчета исполнительных механизмов во внимание принимаются экспериментально установленные значения коэффициента сжимаемости жидкого металла. Для определения продолжительности охлаждения отливки в интервале $\{t^p - [t_s - (100 \dots 150)K]\}$ по показаниям термопар, установленных на разном удалении в стенке формы от поверхности контакта с отливкой, рассчитываются тепловой поток q и общее количество теплоты Q , отведенной от отливки. По результатам исследования свойств отливок вносятся соответствующие коррективы в управляющую программу и в расчеты; эти же результаты учитываются на этапах проектирования оборудования и оснастки.

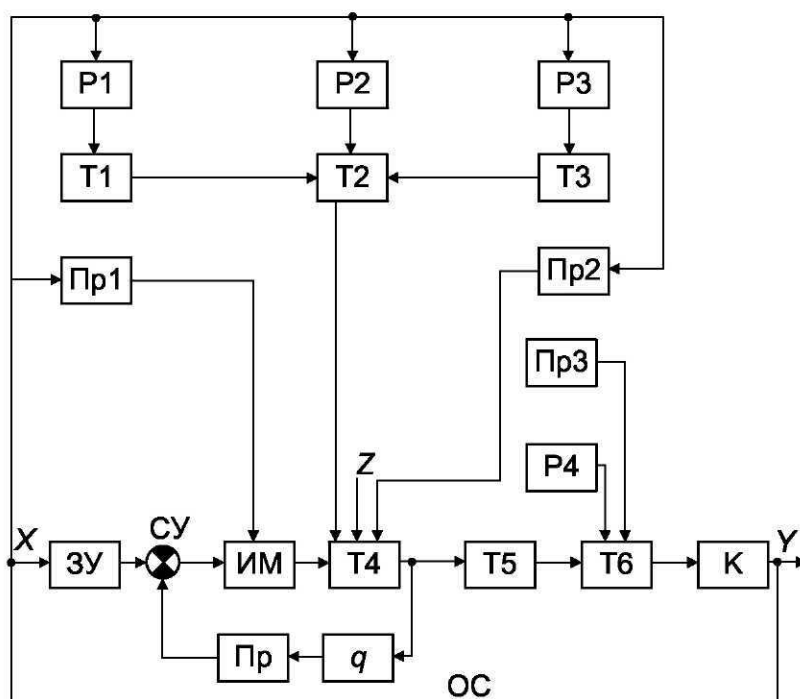


Рис. 18. Последовательность расчетно-проектировочных и технологических процедур, связанных с автоматизацией процесса.
 Обозначения: T1 – выплавка металла; T2 – заполнение формы металлом; T3 – вакуумирование; T4 – наложение давления; T5 – выдержка; T6 – раскрытие формы; P1 – расчет перегрева металла; P2 – расчет режимов заполнения формы; P3 – расчет режимов вакуумирования; P4 – расчет времени выдержки; Пр1 – проектирование оборудования; Пр2 – проектирование технологической оснастки; Пр3 – проектирование приспособлений; К – контроль свойств изделий; ОС – обратная связь; ЗУ – управляющая программа; СУ – сравнивающее устройство; ИМ – исполнительный механизм; q – тепловой поток; Пр – преобразователь; z – внешние возмущения.

Приведенная на рис. 18 схема позволяет также определить основные требования, которым должна отвечать система управления процессом.

Наложение давления на перегретый металл представляет собой сложный и малоизученный физический процесс. Для накопления знаний и изучения закономерностей поведения жидкого металла под давлением в создаваемой системе управления необходимо предусмотреть достаточно полное информационное обеспечение, а также вычислительные возможности для обработки информации и принятия решений в реальном режиме времени.

Глава 2. СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАЛОЖЕНИЕМ ДАВЛЕНИЯ НА КРИСТАЛЛИЗУЮЩИЙСЯ МЕТАЛЛ

В настоящее время достоверно установлено, что если давление создавать изнутри на незакристаллизовавшийся металл, то отливка, по внешней поверхности которой образовалась оболочка из твердых кристаллов, ведет себя как сосуд, нагруженный внутренним давлением. Осциллограммы, свидетельствующие о растяжении корки и возникновении контактного давления на стенку формы приведены в работе [90]. Эта начальная точка в изучении поведения расплава под давлением создает обманчивое впечатление, что жидкий металл и под давлением сохраняет свойства жидкости. В действительности же, судя не по результатам замеров, а по тем экспериментам, которые были отнесены в разряд неудачных, создать давление и при этом компенсировать полностью усадку отливки практически никогда не удастся. Статистика следующая. Если прессующий плунжер подает в отливку достаточный для компенсации усадки объем металла, то это достигается при сравнительно невысоком давлении – примерно 10 – 20 МПа. Но в тех случаях, когда компенсировать усадку не удавалось, давление на прессующем плунжере было достаточно высоким при прочих одинаковых условиях. Эта противоречивость усугубляется тем, что при давлении 10 – 20 МПа относительное уменьшение объема достигает 10 – 12 %, что наводит на предположение о сжатии растворенных газов и межкластерных пространств.

Одной из причин возникших затруднений в понимании зафиксированных фактов является отсутствие информации о температурных полях в отливках, хотя заведомо неизвестно, можно ли такие христоматийные понятия, как двухфазная зона, фронт кристаллизации, температуры ликвидуса, солидуса распространить на металл, который находится в условиях всестороннего сжатия. Можно лишь с осторожностью предполагать, что в одном диапазоне величин накладываемого давления металл ведет себя как жидкость, при дальнейшем же нарастании давления металл останавливается как вода под давлением, превращаясь в лед, теряет присущую ей подвижность. Но это мгновенное состояние. При наличии перегрева и скрытой теплоты кристаллизации в следующий момент после остановки на удалении от прессующего плунжера при переходе из жидкого состояния в твердое объем уменьшится, давление снизится и дальнейшая кристаллизация будет происходить без влияния давления. Поэтому освоение техники и технологии наложения давления целесообразно проводить в два этапа: на первом

этапе оперировать обычными представлениями с учетом зависимости температуры начала кристаллизации от давления; на следующем этапе, который в отличие от первого в большей степени представляет собой физический эксперимент, осуществить необходимое нагружение, замерить параметры состояния и таким образом выявить границу, при достижении которой поведение системы не укладывается в рамках сформировавшихся представлений.

Возможно, наложение давления при температуре $t^P = t_L + (30 - 50 \text{ К})$, способствуя повышению равновесной температуры начала кристаллизации, в то же время переводит металл как термодинамическую систему в стационарное состояние, удаленное от равновесного. Действительно, сближение атомов не способствует протеканию подготовительных процессов перед фазовым превращением. Тогда отвод теплоты приведет к изменению параметров и система окажется неустойчивой. При этом, чем больше система удалена от состояния устойчивого равновесия, тем больше вероятность перехода в новые стационарные состояния с меньшей энтропией и соответственно с большей структурной сложностью [97]. Но в своем стремлении к сложности, как об этом заявлено в работе [105], природа не стремится к некоторому принципу глобальной оптимизации, а занимает более «прагматическую» позицию, в которой существенную роль играет поиск устойчивости.

Приведенные здесь примеры, когда казалось бы все условия для наложения давления и опрессовки металла выполнены, и тем не менее результат может быть достигнут и положительный, и отрицательный, наводят на предположение, что кристаллизацию под давлением следует рассматривать как объект, находящийся в переходном процессе. При отработке одних режимов управления система перейдет в новое состояние, в то же время, например, отсутствие отвода теплоты приведет к остановке процесса. Наконец, быстрое нарастание давления опасно в смысле потери устойчивости управления, когда колебательный характер процесса выражается в том, что кристаллизация будет идти рывками и влияние давления непредсказуемо.

Тем не менее сильно неравновесное состояние, по Пригожину [106], в отличие от равновесного, с одной стороны, более предрасположено к изменениям и прогрессивному развитию, с другой стороны, требует учитывать нелинейные эффекты и оперировать парадигмами нелинейной термодинамики необратимых процессов.

Следовательно, систему управления наложением давления по структуре и функциональным возможностям следует сориентировать на отработку устойчивых режимов функционирования, когда критические значения параметров, определяющие роль флуктуаций на переход системы в новое состояние с меньшей энтропией, отслеживаются в реальном масштабе времени, а управляющие воздействия обеспечивают развитие системы как последовательное прохождение неустойчивостей в направлении формирования структур с более высоким уровнем организации.

2.1. Согласование режимов наложения давления со скоростью охлаждения

Положение равновесных температур ликвидуса и солидуса может изменяться в зависимости от внешних условий, в частности от скорости охлаждения. Для определения неравновесных величин введена специальная величина – степень метастабильности M , характеризующая величину переохлаждения, на которую можно изменить равновесные ликвидус и солидус.

Необходимую для образования кристалла степень переохлаждения создают за счет соответствующей организации отвода тепла. Но при производстве изделий с достаточно массивными сечениями по мере роста и увеличения толщины закристаллизовавшейся корочки темп охлаждения замедляется, направленный рост кристаллов прекращается, в окрестности зародышевых центров формируется грубая кристаллическая структура, развивается ликвация, в результате усадки возникают полости и раковины. В этих условиях наложение внешнего давления позволяет чисто механически сблизить кристаллы, уплотнить структуру. Но если давление накладывается на незакристаллизовавшийся металл, то может произойти повышение температуры кристаллизации, что равносильно повышению скорости охлаждения. Таким образом, степень переохлаждения M можно рассматривать как функцию двух переменных: скорости охлаждения $V_{\text{охл}}$ и величины давления p :

$$M = f(V_{\text{охл}} p).$$

После дифференцирования имеем:

$$dM = \frac{\partial M}{\partial V} dV_{\text{охл}} + \frac{\partial M}{\partial p} dp = AdV_{\text{охл}} + Bdp. \quad (33)$$

Что касается частной производной A , то при $p = 0$

$$A = \Delta t = \frac{L}{c},$$

где L – скрытая теплота кристаллизации, c – теплоемкость. То есть A соответствует минимальному переохлаждению, при котором образовавшийся кристалл аккумулирует L . Физический смысл константы B может быть связан с функцией $\Delta t = F(p)$. При $V_{\text{охл}} = 0$, $B = kp$, где k – эмпирический коэффициент, который, в частности, для алюминия составляет 0,633 К/МПа [107].

Таким образом, изменение давления может быть связано со скоростью охлаждения зависимостью

$$dp = \frac{M - AdV_{\text{охл}}}{B}. \quad (34)$$

Однако определение скорости охлаждения на фронте, разделяющем твердую и жидкую фазы, связано со значительными математическими трудностями. Стенку слитка или отливку следует рассматривать как систему, состоящую из трех зон: жидкой, двухфазной и твердой, распределение температур, в которых в соответствии с гипотезой Фурье аппроксимируют системой дифференциальных уравнений в частных производных с нелинейным условием Стефана. Однако корректность такой интерпретации по отношению к металлу, который находится под давлением, должна быть доказана теоретически или иметь экспериментальное подтверждение. Поэтому все последующие рассуждения выполнены без поправок на влияние давления.

По опытным данным величина давления, накладываемого на кристаллизующийся металл, составляет 50...200 МПа, с учетом площади плунжера Ø45 мм требуемое усилие достигает 0,3 МН, к тому же привод должен быть достаточно динамичным, особенно при производстве тонкостенных отливок. Поэтому в качестве исполнительного механизма используется гидропривод, который вместе с кристаллизующимся металлом и технологической оснасткой рассматривается как единая система.

Скорость охлаждения металла может быть определена по изменению температуры формы, а давление на металл p можно определить либо измеряя давление непосредственно в полости формы, либо косвенно как разность давлений в напорных полостях прессующих гидроцилиндров, или как функцию перемещения плунжеров.

Для согласования закона наложения давления со скоростью охлаждения отливки на рис.19 схематически представлены кривые 1, 2, 3, 4, характеризующие охлаждение отливки, причем кривая 1 – это изменение температуры непосредственно у поверхности; кривая 4 – в центре сечения отливки; кривые 2, 3 – в промежутке между 1 и 3.

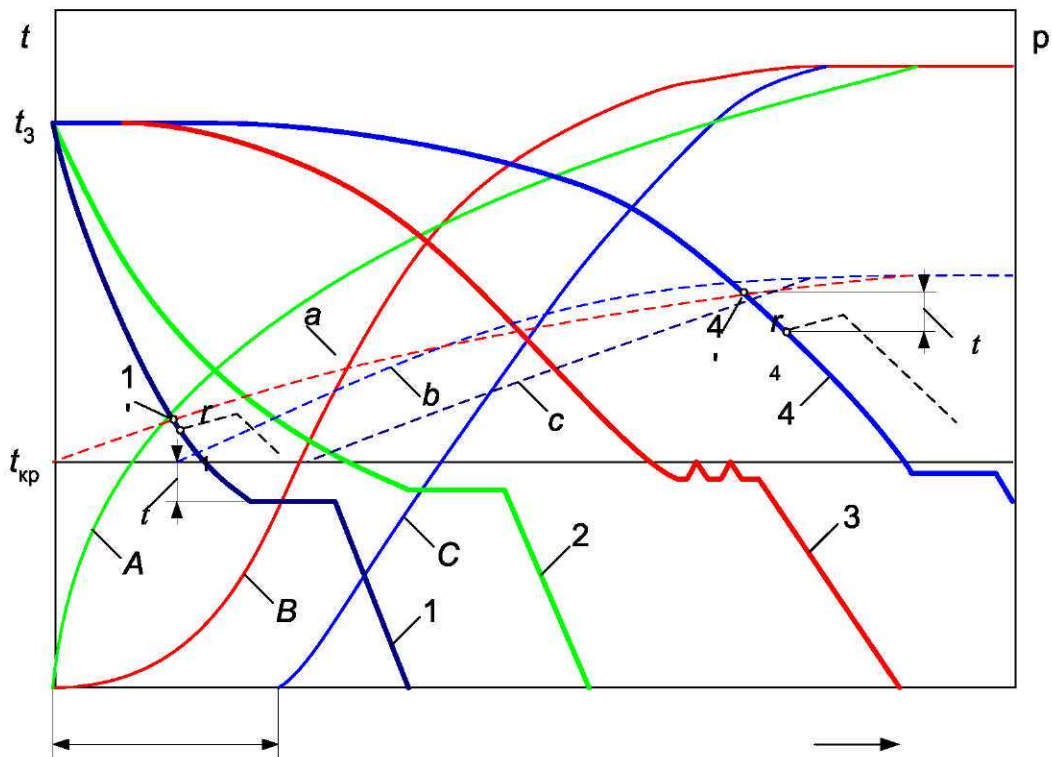


Рис. 19. Согласование режимов охлаждения и наложения давления

С уменьшением скорости охлаждения степень переохлаждения Δt при обычной кристаллизации уменьшается. На кривой 3 показан процесс, в котором за счет скрытой теплоты кристаллизации система возвращается в равновесное состояние. Кривые, обозначенные A, B, C, соответствуют различным вариантам наложения давления, в том числе и с запаздыванием τ_3 (кривая C). Пунктирными линиями a, b, c представлены функции зависимости температуры кристаллизации от давления – $t_{кр}(p)$. Если давление изменяется по закону A, то пересечение кривых охлаждения, например 1 и 4 с $t_{кр}(p)$ – кривая a, происходит в точках 1' и 4', а кристаллизация начинается при температурах, обозначенных соответственно r_1 и r_4 , смещенных относительно точек пересечения на величину переохлаждения.

Позднее наложение давления (кривая *c*) не оказывает влияния на кристаллизацию в сечениях 1 и 2 и его влияние будет распространяться лишь на ту часть стенки отливки, которая располагается ближе к сердцевине. Вышеупомянутые случаи потери устойчивости управления можно прокомментировать следующим образом.

Охлаждение слоев отливки, контактирующих с относительно холодной стенкой формы в первые моменты времени после заливки, происходит с высокой скоростью, о чем свидетельствуют осциллограммы прогрева формы [106]. Поэтому, естественно, в управляющую программу закладывается быстрое включение плунжера. Быстрое нарастание давления вызывает повышение t_L^* . Текущая температура в слое 1 снижается, а температура t_L^* движется навстречу. Если плунжер сечения 1 пройдет, когда $t_1(\tau) > t_L^*$, он будет взаимодействовать с жидким металлом, сопротивление которого преодолевает, а далее на его пути будет металл с еще более высокой температурой, так что управление его движением и наложением давления будет проходить в устойчивом режиме. Если же $t_1(\tau) < t_L^*$, то плунжер столкнется с твердой коркой, сопротивление которой будет возрастать пропорционально увеличивающейся толщине корки. В этом случае причиной потери устойчивости управления будет недостаточное быстроедействие гидропривода. Однако прорыв сопротивления твердой корки в условиях быстрого нарастания давления может привести к повторной потере устойчивости, если давление высокое и при этом $t_L^* = t(p) \geq t_3$, т.е. фиксируется неравновесное состояние, варианты управления в котором пока неизвестны.

2.2. Основные принципы управления

Автоматическое управление давлением и соответственно перемещением исполнительного органа гидропривода – плунжером – происходит в условиях неопределенности, связанной с отсутствием достаточной статистики о поведении управляемого объекта, необходимостью учитывать неформализуемые или трудно формализуемые факторы, характеризующие протекание процесса. Причем ряд факторов, влияющих на его ход, имеют случайный характер. Детерминировать процесс кристаллизации таким образом, чтобы все факторы в любой момент времени были заранее учтены, невозможно. Учет возникающих ситуаций с целью воздействия на процесс

кристаллизации таким образом, чтобы его ход отвечал задачам, которые решает этот процесс, возможно осуществить только путем создания адаптивных систем управления.

В результате анализа предъявляемых требований была предложена следующая структура системы управления (рис. 20). Система принадлежит к классу самонастраивающихся систем с математической моделью и имеет две обратные связи: основную о температуре (скорости охлаждения) и внутреннюю корректирующую связь по положению. Информация о состоянии процесса формируется посредством преобразователей ПР и датчиков: ДТ (температуры) и ДП (перемещения). ДТ предназначен для получения значения контролируемой величины, в данном случае – $V_{\text{охл}}$ с целью определения степени переохлаждения, характеризующей протекание процесса. ДП предназначен для получения информации о положении плунжера и применяется для корректировки процесса. Вся информация о процессе кристаллизации, полученная в результате прямых измерений или (и) путем вычислений, сохраняется в базе данных программы, где с использованием предыдущей информации рассчитываются и с помощью задатчика выдаются коэффициенты для функции управления, в свою очередь полученные данные поступают в сравнивающее устройство СУ. На СУ также подается сигнал от вычислителя, который с помощью информации от ДТ вырабатывает корректирующий сигнал. С помощью функции управления $W_{\text{кр}}$ определяется требуемое управляющее воздействие p на гидропривод $W_{\text{гп}}$, которое затем преобразуется в необходимую величину перемещения плунжера x .

СУ осуществляет сравнение и корректировку сигнала управления в соответствии с информацией, полученной с ДП и преобразованной в удобный для сравнения вид. На выходе СУ управляющий сигнал поступает на функциональный преобразователь (ФП), который выдает сигналы для управления исполнительным гидроцилиндром (ИГЦ).

Гидропривод, используемый для наложения давления на кристаллизующийся металл, помимо статических (развиваемое усилие, жесткость) и динамических (устойчивость, точность, качество переходного процесса) характеристик должен отвечать такому специфическому требованию, как возможность управления законом изменения развиваемого усилия и скорости перемещения.

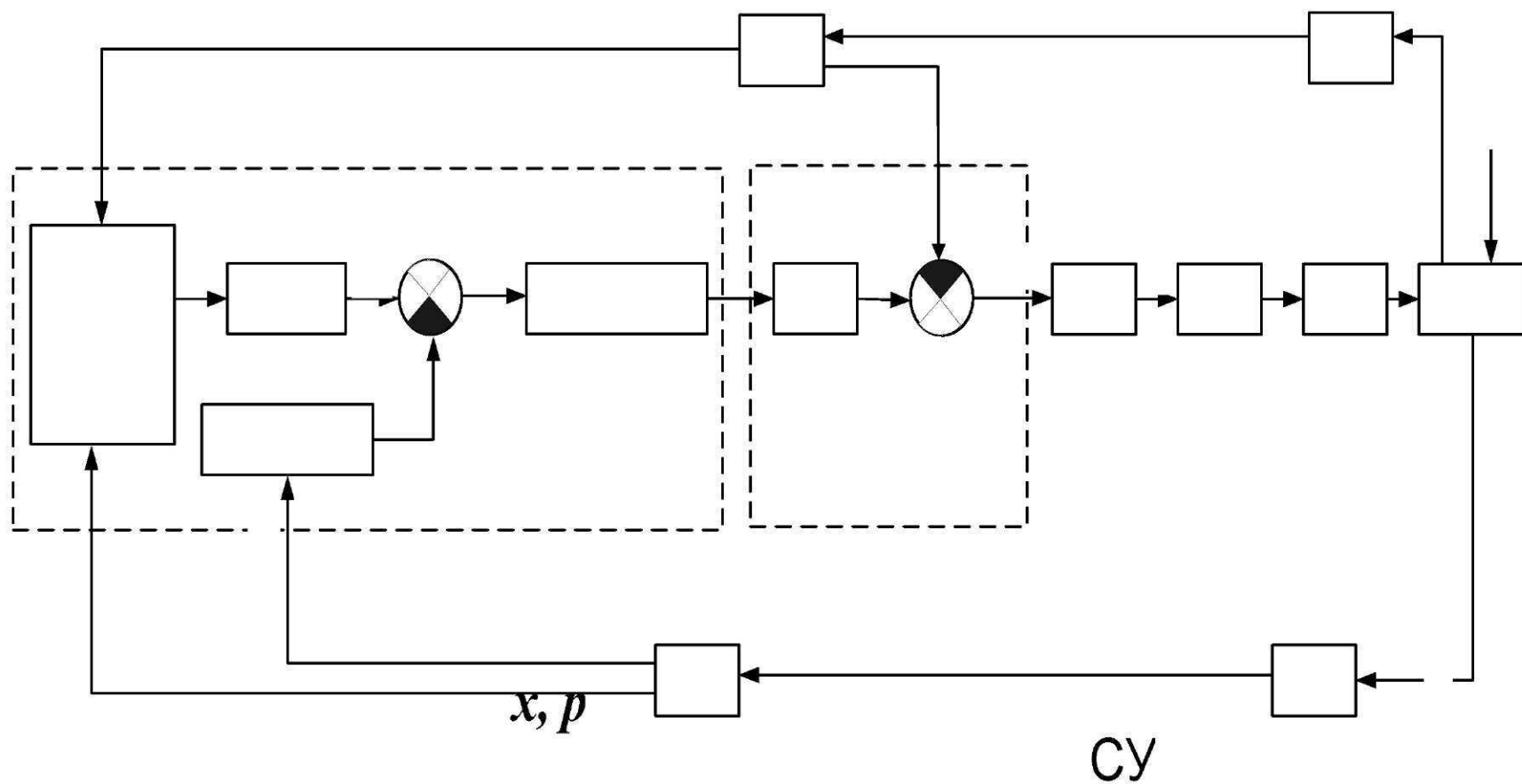


Рис. 20. Структурная схема СУ

69

База
данных

Задатчик

$v_{охл}$

$\Delta v_{охл}$

$W_{\text{кристаллизации}}$

$v'_{охл}$

К числу параметров, определяющих усилие и скорость перемещения плунжера, относятся давление в рабочей полости цилиндра и полости слива, масса движущихся частей, силы трения, площади поршня в напорной и сливной полостях.

В зависимости от требований, предъявляемых к свойствам и качеству отливок, закон изменения усилия и скорости, развиваемых гидроцилиндром, можно регулировать в широких пределах. В свою очередь управление этими параметрами гидропривода может быть осуществлено различными путями, например, с помощью модуляции или объемного регулирования.

Для автоматического управления рабочим органом привода необходима система, обеспечивающая требуемое изменение скорости на каждом участке с точной остановкой поступательно движущихся частей в крайнем положении.

Давление можно регулировать различными методами. При объемном регулировании – изменением площадей сечения напорной f и сливной f_c линий для каждой из полостей цилиндра соответственно. Например, при наличии в системе пропорциональных клапанов на участке разгона регулируется отношение между площадями сечения f_1 и f_{2c} , а на участке торможения – между f_{1c} и f_2 (f_{1c} и f_{2c} – площадь сечения сливной линии для рабочей и штоковой полостей гидроцилиндра; f_1 и f_2 – площадь сечения напорной линии для рабочей и штоковой полостей соответственно) либо при наличии отсекающих клапанов давление можно регулировать с помощью импульсной модуляции, например широтно-импульсной. В этом случае клапан выступает как импульсный элемент, и давление зависит от длительности импульса Δt_n (открытия клапана) при постоянном периоде повторения Δt .

Для варианта широтно-импульсной модуляции схема программирования и отработки закона наложения давления приведена на рис. 21. В данном случае рассмотрен частный случай зависимости давления в гидроцилиндре $p(Q)$ как функции от расхода жидкости в гидросистеме, а закон наложения давления как функции времени, но связанной со скоростью кристаллизации, обозначен $p(t_{кр})$ и представлен функциями β_1 и β_2 .

Для реализации управления необходимо, пользуясь экспериментальными установленными зависимостями, определить время разгона τ_0 , а для участка движения с постоянной скоростью определить частную производную $\partial p(Q)/\partial \tau$. Тогда график β_2 можно аппроксимировать сложной кривой

Oabcdefiklm..., при этом время включенного состояния, как видно из рис. 21, будет определяться по формуле

$$\Delta\tau_n = \left[\frac{\Delta p(Q)}{\partial p(t_{кр}) / \partial \tau} \right]. \quad (35)$$

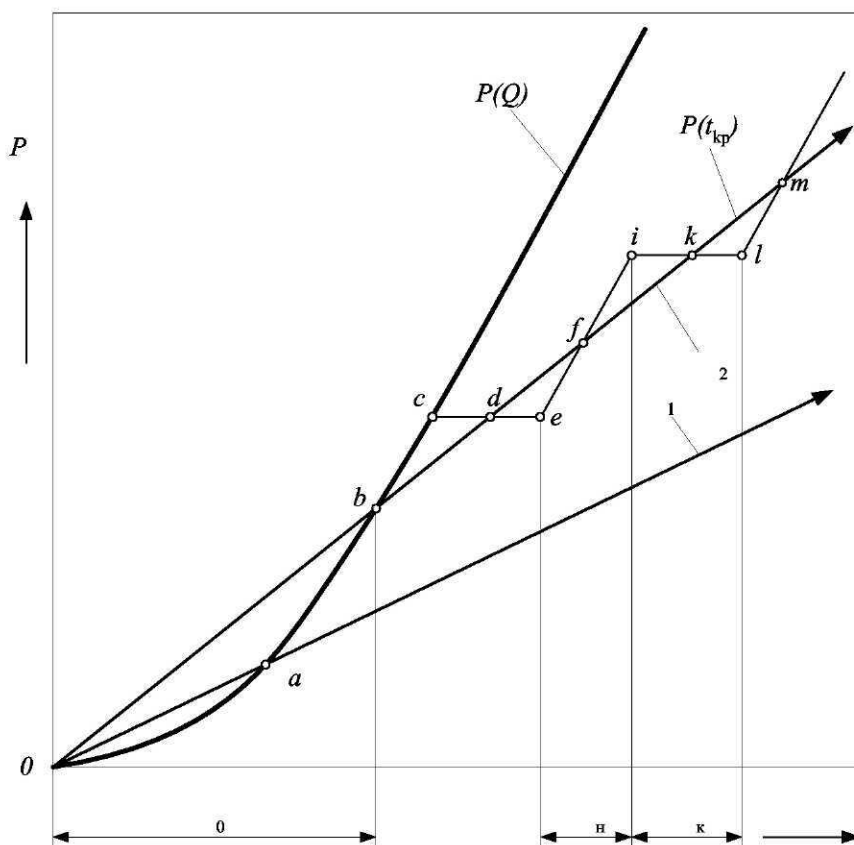


Рис. 21. Программирование и обработка закона наложения давления

Для обеспечения позиционирования система управления в соответствии с программой сравнивает текущую координату поршня x_i с координатой, вычисленной по уравнению (35), а по достижении их равенства подает команду на отключение подачи рабочей жидкости.

2.3. Экспериментальный технологический комплекс

Для проведения исследований разработан технологический комплекс, который позволяет управлять процессом наложения давления, автоматизировать процессы сбора и обработки информации и принятия решений об

изменении условий эксперимента. Структурная схема комплекса приведена на рис. 22, она представляет собой по существу сложную мехатронную систему с компьютерным управлением.

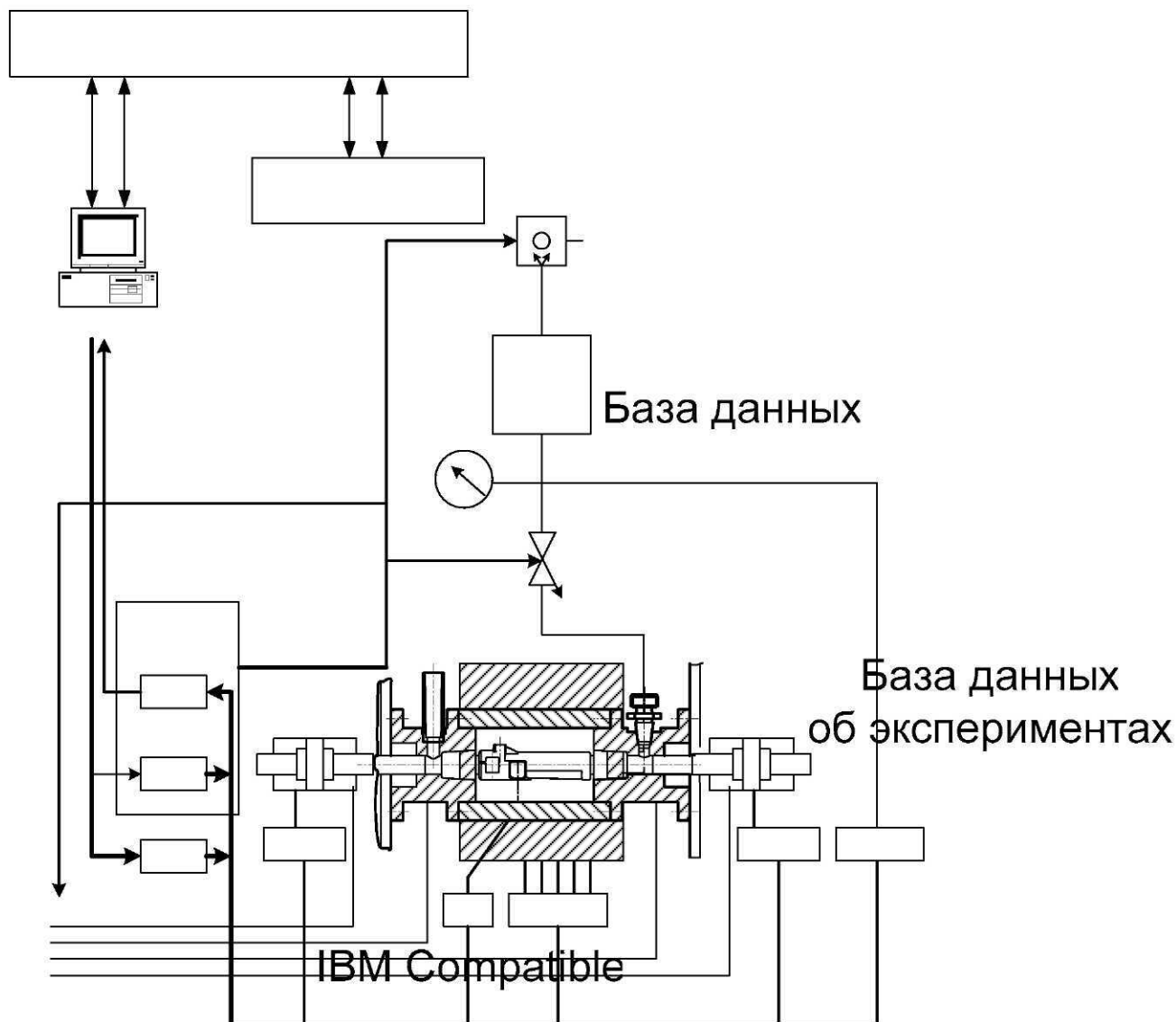


Рис. 22. Структурная схема комплекса

Комплекс включает:

- пресс ПЛД-300 [96];
- вакуумную систему;
- информационно-измерительную систему;
- управляющую ЭВМ (*IBM Pentium*);
- устройства связи с объектом управления, а также специальную экспериментальную технологическую оснастку.

Уместно подчеркнуть, что исследования проводятся в условиях, максимально приближенных к производственным.

Пресс представляет собой гидравлическую машину для литья с кристаллизацией под давлением, с горизонтальным расположением основных силовых агрегатов (рис. 23). Пресс имеет несколько принципиальных решений, специализированных для данного вида литья.

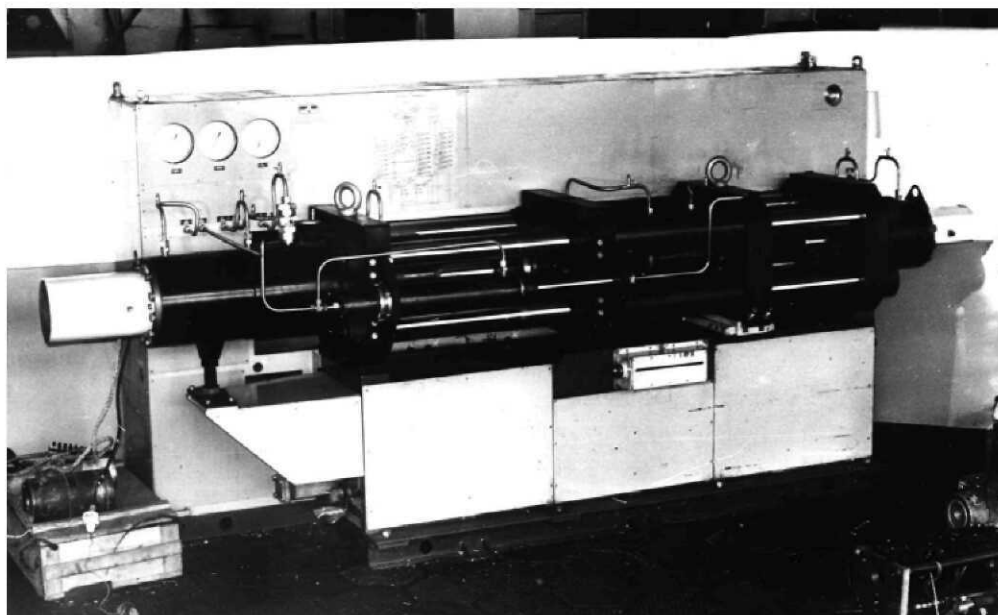


Рис. 23. Общий вид прессы ПЛД-300

Основные характеристики прессы ПЛД-300

Максимальное усилие, развиваемое подвижной плитой прессы, МН	3
Ход плиты прессы на открывание формы, при размерах рабочего пространства для установки формы 500x500x500, мм	50
Скорость холостого хода плиты прессы, мм/с	50
Рабочее усилие гидроцилиндра для наложения давления, МН.....	0,3
Число гидроцилиндров	2
Расположение гидроцилиндров	соосное
Скорость холостого хода, мм/с	60

Одним из вариантов управления может быть подача давления одновременно в обе полости гидроцилиндра с последующим импульсным стравли-

ванием рабочей жидкости на слив. Поэтому при выборе типа гидрораспределителей остановились на электромагнитных нормально закрытых спаренных гидроклапанах типа «напор-слив». Причем при подаче электрического сигнала на левый клапан в рабочую полость гидроцилиндра подается рабочая жидкость под давлением, при включении правого клапана та же полость соединяется со сливом. В этом состоит одна из существующих особенностей разработанной гидравлической системы (рис. 24).

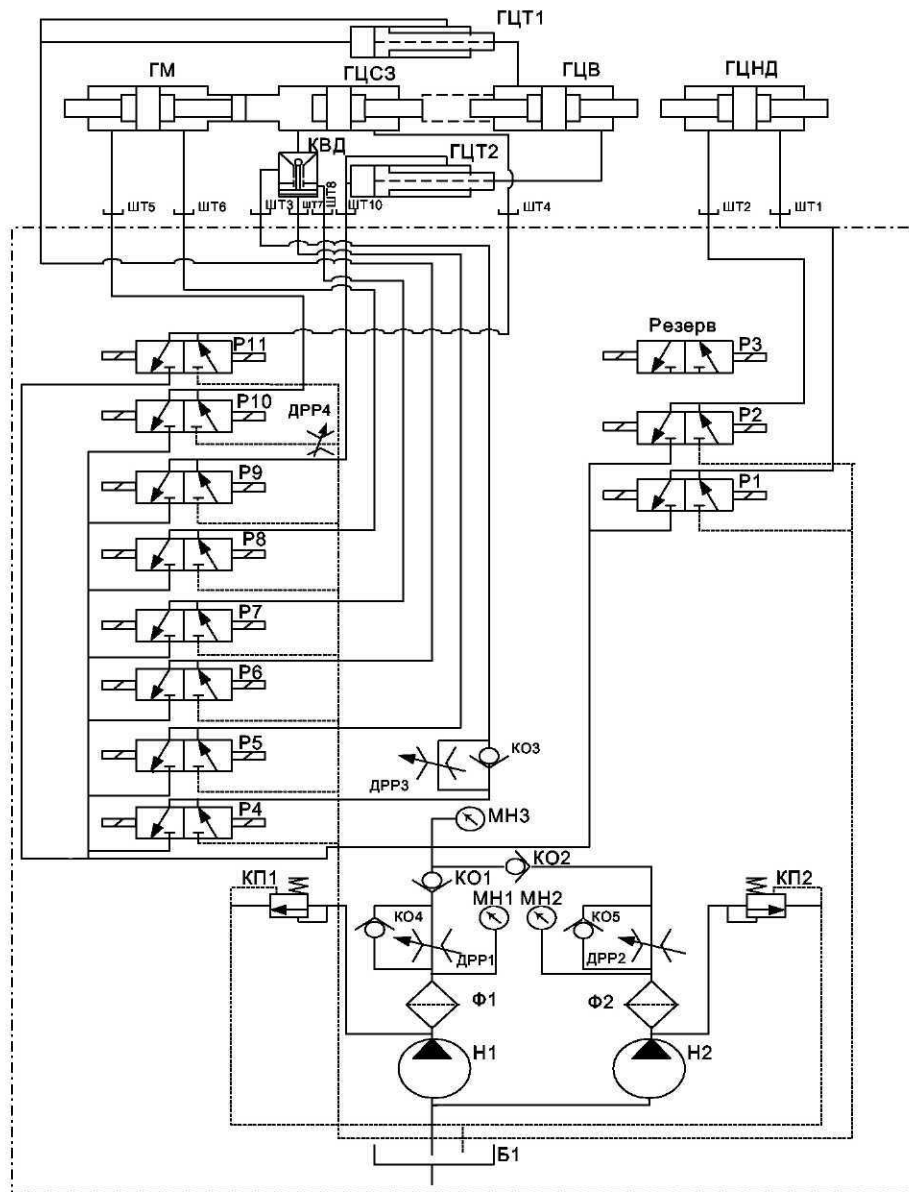


Рис. 24. Гидравлическая схема прессы

На гидравлической схеме прессы использованы следующие обозначения: ГЦНД – гидроцилиндр наложения давления; ГЦВ – гидроцилиндр

встроенный; ГЦСЗ – гидроцилиндр силового замыкания; ГЦМ – гидроцилиндр мультипликатора; ГЦТ – гидроцилиндр телескопический; КВД – клапан высокого давления; ШТ – присоединительная арматура; Р – клапан, Н – гидронасос; Ф – фильтр, ДРР – дроссель регулируемый; КО – клапан обратный; КП – клапан перепускной; МН – манометр; Б – бак сливной; Д – датчик.

Для защиты гидросистемы от гидроударов при отключении КВД в соответствующей магистрали предусмотрены клапан КОЗ и дроссель ДРРЗ. Плавность отвода мультипликатора контролируется с помощью дросселя ДРР4.

Управление работой гидросистемы осуществляется с пульта ручного управления или в автоматическом режиме от компьютерной системы управления.

Гидросистема включает два нереверсивных нерегулируемых насоса с постоянной производительностью (Н1, Н2), два фильтра (Ф1, Ф2), два регулируемых дросселя (ДРР1, ДРР2) с обратными клапанами (К04, К05), два электромагнитных клапана (КП1 и КП2), два обратных клапана (К01, К02), манометры (МН1, МН2, МН3) и сливной бак Б1.

В составе гидросистемы предусмотрены десять электрогидравлических переключателей (Р1, Р2, Р4, Р5, Р6, Р7, Р8, Р9, Р10, Р11) и один клапан высокого давления. Электрогидравлический дискретный переключатель (Р11) сообщается с полостью цилиндра силового замыкания.

Работа клапана высокого давления происходит следующим образом: при подаче давления с Р7 клапан высокого давления закрыт и жидкость, находящаяся в цилиндре силового замыкания (полость движения вперед), оказывается заперта, при этом представляется возможность включить в работу ГЦМ–мультипликатор давления (с помощью Р8 и Р10); при подаче давления с Р5 КВД открывается, при этом можно либо двигать плиту вперед, либо при помощи Р5, либо переключателями Р8, Р10, либо сливать рабочую жидкость через Р5 и трубопровод в сливной бак.

Электрогидравлические переключатели Р1, Р2, Р4, Р5, Р6, Р7, Р8, Р9, Р10, Р11 работают таким образом: электромагнит включен, переключатель соединяет полость цилиндра со сливом; электромагнит выключен, полость цилиндра сообщается с напорной магистралью.

Конструкторская документация на программно-аппаратный комплекс выполнена с использованием отечественной САД системы «Компас 3D».

2.4. Аппаратная реализация системы управления прессом

Система управления выполнена на основе ЭВМ семейства *IBM PC/AT*.

В разработанном программно-аппаратном комплексе устройство связи с объектом реализовано на интерфейсной плате сбора данных *L-154* фирмы *L-card* (Россия). Плата *L-154* предназначена для преобразования аналоговых сигналов в цифровую форму для персональной ЭВМ, а также для ввода/вывода цифровых ТТЛ линий и управления одним выходным аналоговым каналом (цифро-аналоговый преобразователь). Она включает встроенный 12-битный АЦП на 16 дифференцированных каналах (32 с общей землей), 12-разрядный ЦАП, восемь цифровых входных и восемь выходных ТТЛ линий, три счетчика – таймера, при помощи которых осуществляется программная синхронизация ввода и генерирование прерываний *IRQ* [108].

Взаимодействие информационно-измерительной системы, состоящей из датчиков и преобразователей, с объектом управления и системой управления представлено на рис. 25.

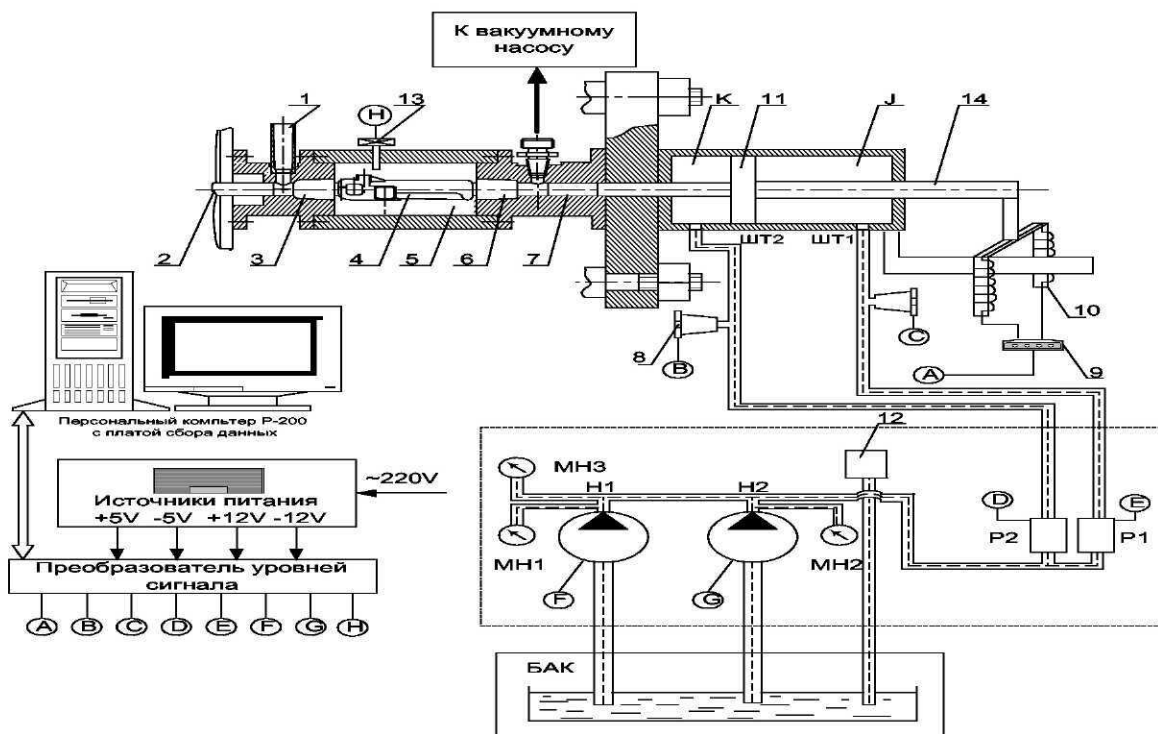


Рис. 25. Фрагмент функциональной схемы системы управления гидроприводом.

Обозначения: 1 – заливная чаша; 2 – плунжер левый; 3 – камера опрессовки; 4 – полость формы; 5 – форма с плоскостью разъема; 6 – камера опрессовки; 7 – плунжер правый; 8 – датчик давления МД-150Т; 9 – преобразователь датчика перемещения; 10 – две катушки индуктивности; 11 – поршень; 12 – бак для подпитки гидросистемы; 13 – датчик температуры; J, K – полости гидроцилиндра; 14 – шток

2.5. Программная реализация системы управления

Законы функционирования технологического комплекса определяются прикладной программой. Специализация системы управления осуществляется путем разработки прикладных программ и аппаратуры согласования и связи системы с датчиками и исполнительными механизмами приводов.

Программное обеспечение разработано в среде интегрированной разработки приложений для *Windows 9X/ME/2000/XP* – *C++Builder 5.0*. Оно разбито на два предметно-ориентированных модуля: модуль управления и снятия показаний с объекта управления (пресса ПЛД-300) и модуль обработки и анализа собранной информации. Модули связаны между собой через общий формат файла данных, имеющего оригинальную структуру. Главные окна модулей управления представлены на рис. 26, 27.

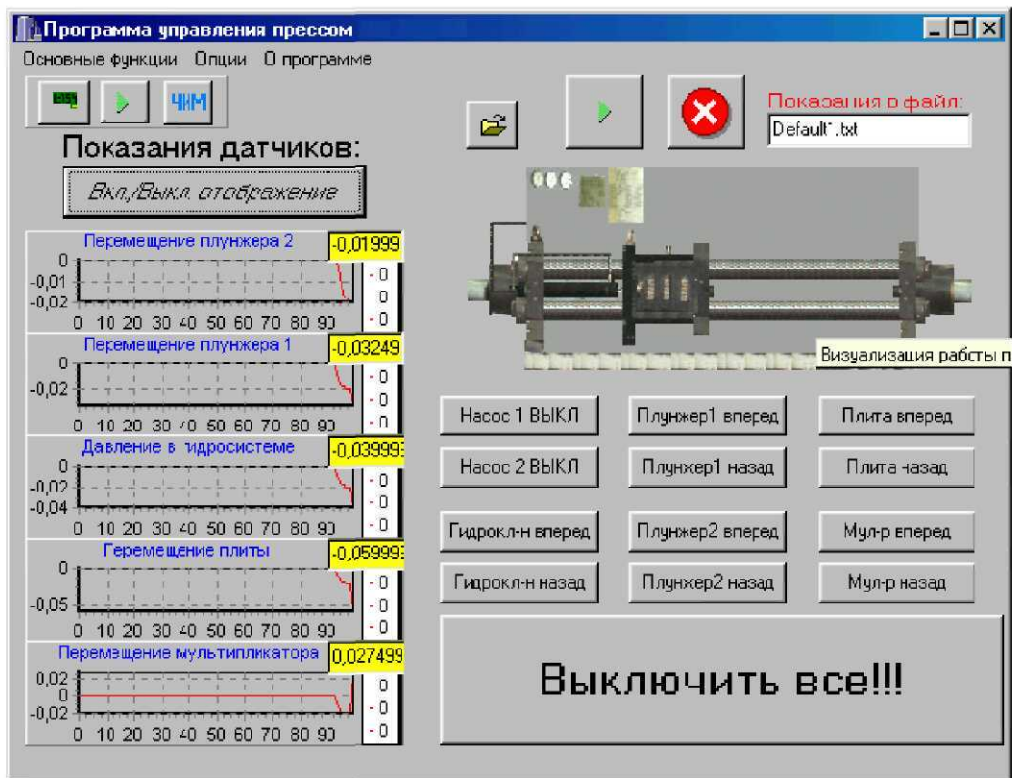


Рис. 26. Главное окно модуля управления

Для наложения давления на расплавленный металл по некоторому заданному закону в модуле управления предусмотрена функция, реализующая широтно-импульсную модуляцию электрического сигнала на дискретный электрогидравлический клапан пресса (рис.28).

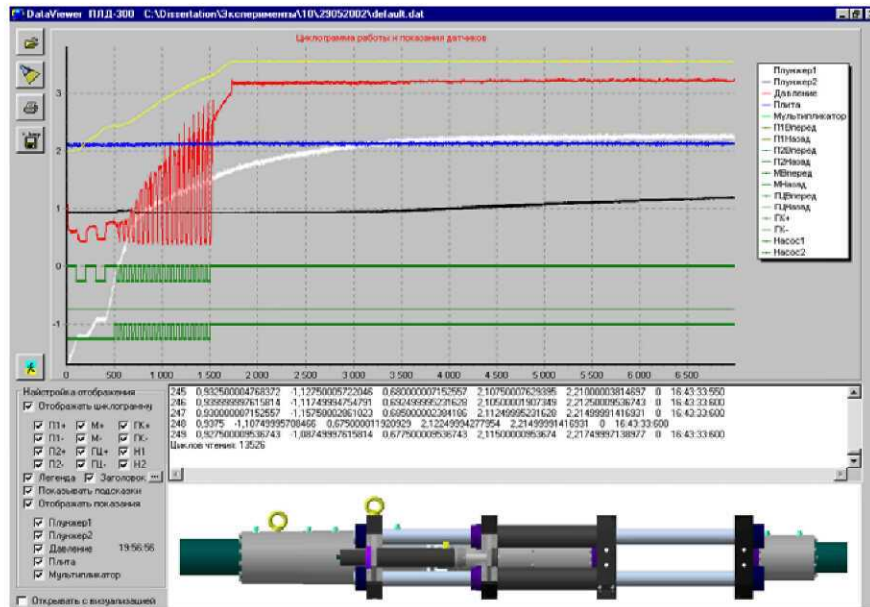


Рис. 27. Главное окно модуля анализа



Рис. 28. Нарастание давления в полости гидроцилиндра в режиме широтно-импульсной модуляции сигнала на клапан

В каждом конкретном случае закон наложения давления отрабатывается с использованием результатов предварительных исследований и математического моделирования.

Глава 3. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО ПРОЦЕССА И АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

К деталям газотехнического назначения относятся корпуса редукторов, дросселей, распределителей, задвижек, а также рукоятки газовых резаков, вентили и др. Потребность в названных деталях в машиностроении, на транспорте, в жилищно-коммунальном хозяйстве измеряется сотнями тысяч. Одним из главных требований к этим деталям является отсутствие в структуре металла таких дефектов, как газовые раковины, поры и трещины. Поэтому традиционно, не считаясь ни с какими затратами, детали изготавливают механической обработкой, в качестве исходной заготовки используют прокат. Возможность перевода широкой номенклатуры изделий газотехнического назначения, а также подобных им деталей и изделий для пневмо- и гидроарматуры давно привлекает внимание специалистов. В этой связи реализация идеи формирования однородной плотной структуры из сильно неравновесных состояний представляет значительный практический интерес, однако наложение давления – это лишь составная часть технологического процесса, включающего этапы выплавки металла, заполнения формы, вакуумирования, опрессовки и т.д. Для каждой отливки с учетом ее конфигурации, размеров, рода сплава, из которого она изготовлена, предъявляемых требований и т.д. режимы литья и наложения давления могут быть установлены на основании поисковых исследований. Поэтому изучать формирование структуры на абстрактных образцах и моделях вряд ли целесообразно, тем более что система управления технологическим процессом располагает информационным обеспечением, необходимым для анализа и обобщения результатов, полученных на отдельных отливках.

3.1. Литье с вакуумированием и динамической опрессовкой кристаллизующегося металла как альтернатива серийной технологии

Необходимость производства литых изделий со структурой и свойствами, не уступающими таковым в заготовках, полученных с использованием процессов пластического деформирования металлов, определяется целым рядом причин. Традиционные технологии производства металлопродукции, основанные на обогащении и переработке руды, по существу не пре-

терпели изменений на протяжении всего XX столетия. Последствия нерационального использования природных ресурсов сегодня приблизились к критическим пределам по целому ряду показателей:

- выбросы загрязняющих веществ, содержащихся в атмосфере в виде аэрозолей, измеряются миллионами тонн;
- концентрация углекислого газа угрожает существованию планеты;
- запасы элементов Cr, Ni, V практически полностью исчерпаны, Mn становится дорогим и дефицитным металлом, не говоря о Ti, Mo, W, Ta, Nb, Zr и др.;
- на переработку руды и производство металлопродукции затрачивается не менее 50 % всей вырабатываемой энергии, 90 % которой – это нефть, уголь, природный газ.

По оценкам специалистов [111], основной причиной сложившегося положения являются устаревшие технологии и примитивное производственное оборудование.

Наложение давления можно использовать для создания системно-интегрированных технологий, при осуществлении которых ресурсоемкие переделы металлургического производства, включая добычу и переработку руды, выплавку и разливку, нагревы, резку, прокатку, ковку и штамповку, заменяются на одну технологическую операцию, осуществляемую во время кристаллизации металла. А это, в свою очередь, создает качественные предпосылки для коренного и принципиального изменения маршрута движения изделий на протяжении полного жизненного цикла.

Если до настоящего времени этот цикл обрывается после того как изделие попадает в металлолом, замешивается с другими изделиями и в лучшем случае удастся использовать 50...60 % металла, то в предполагаемом варианте один и тот же материал может многократно проходить жизненный цикл по схеме: производство → эксплуатация → возврат в плавильный агрегат → литье с вакуумированием и программным наложением давления, обеспечивающим восстановление конфигурации, размеров и свойств → эксплуатация → возврат в плавильный агрегат и т.д.

Данная схема позволяет на 80...90 % сократить добычу руды, снизить производство первичных материалов, что с учетом чрезвычайно крупных масштабов потребления металлопродукции может коренным образом снизить техногенные воздействия на окружающую среду, привести производственные технологии в соответствие с международными стандартами по экологичности серии *ISO 14000*.

3.2. Управление вакуумированием и наложением давления

Литье под давлением конкурирует с процессами, в которых придание формы, размеров, точности и физико-механических свойств происходит в условиях пластического деформирования металла.

Выдающиеся результаты, достигнутые В.М. Беловым при освоении литья стали, титана и других металлов под давлением, развеяли устоявшееся мнение о том, что свойства литого металла заведомо ниже свойств пластически деформированного [25–27]. Правда, приближение свойств отливок к свойствам штампованных заготовок было достигнуто на изделиях сравнительно небольших размеров с толщиной стенки 2...5 мм – это спусковые крючки стрелкового оружия, элероны, лопадки и т.п. детали, масса которых составляет 100... 200 г. Расширение номенклатуры на более массивные, толстостенные и тем более корпусные детали с неизбежностью упиралось в проблему пресс-форм, стойкость которых с увеличением массы запрессовываемого металла катастрофически снижалась.

К сказанному выше необходимо добавить, что исходной заготовкой при литье стали под давлением служит тщательно очищенный от окалины прокат; плавка мерной дозы на одну запрессовку производится в индукционной печи в интенсивном режиме во избежание окисления и насыщения газами. Это недостаток процесса, так как сам прокат имеет высокую стоимость, так как затрачены значительные ресурсы. Но будет уместным заметить, что и при производстве штампованных заготовок также используется прокат.

Естественно возникает вопрос, почему специалисты взамен пластическому деформированию отдали предпочтение литью под давлением. Освоение новой технологии и накопление опыта происходило на крупных оборонных предприятиях, исследования проводились с участием крупных отраслевых институтов. Параллельно с литьем под давлением высокотемпературных сплавов велись разработки по созданию новых материалов, по освоению высокоскоростной штамповки, по автоматизации и роботизации производства.

Интерес к высокоскоростной штамповке не был случаен. С точки зрения создания условий для формоизменения заготовки и нагружения инструмента высокоскоростная штамповка обеспечивает большую степень пластической деформации металла в единицу времени, что при прочих одинаковых условиях приводит к снижению продолжительности контакта

штампа с заготовкой. Однако оборудование, так называемые беспшаботные молоты, оказалось сложным по конструкции и в эксплуатации, что в конечном итоге и привело к приостановке работ в данном направлении.

Но есть и другая причина. К материалам штампов для высокоскоростной штамповки наряду с теплостойкостью и сопротивлением термической усталости предъявляют высокие требования по ударной вязкости и энергии разрушения. В этой связи уместно указать на наш опыт [110], когда броневая сталь была внедрена с достаточно высоким экономическим эффектом при изготовлении литых вставок массой до 160 кг для штамповки на паровом молоте с массой падающих частей 5 т.

Важным обстоятельством не в пользу штамповки на молотах стало нарастающее недовольство населения городов грохотом и толчками почвы во время работы оборудования, особенно в ночное время. Запрет на эксплуатацию молотов в немалой степени связан также с разрушением производственных и жилых зданий под влиянием вибраций.

В настоящее время штамповка осуществляется на кривошипных и гидравлических прессах, но в данном случае главное преимущество штамповки – кратковременный контакт с заготовкой – оказалось раз и навсегда потерянным и представляет теперь больше исторический, нежели технический интерес.

Литье под давлением как конкурирующий процесс заготовительного производства свой шанс выступить взамен штамповки получило в ситуации, когда по производительности и общим затратам на подготовку производства оба процесса практически сравнялись.

Дело в том, что штамповка на кривошипных и гидравлических прессах происходит за один ход инструмента, а продолжительность контакта такова, что температура на поверхности штампа достигает или даже превышает критические значения, когда выбраковка штампа наступает в результате смятия и классифицируется не как закономерный износ, а как аварийная поломка. Если за один ход пресса необходимая конфигурация не может быть получена, назначается штамповка в двух и более ручьях штампов. Это многооперационная штамповка, требующая дополнительных затрат на штампы, на подогрев заготовок. Здесь у литья под давлением существенное преимущество – достаточно сложная конфигурация может быть получена в одной пресс-форме, так как расплавленный металл не требует больших затрат энергии на заполнение полости.

Но самое важное преимущество литья под давлением состоит в том, что достаточно сложные по конфигурации заготовки можно получать в многоместных формах, в которых сравнительно большая площадь проекции отливок на плоскость разъема штампа при давлении примерно 30 МПа может быть получена на сравнительно простом оборудовании с усилием запирания пресс-формы 250 тс. Для осуществления горячей штамповки требуется оборудование типа японского прессы «*CURIMOTO*», стоимость которого в десятки раз превышает затраты на приобретение, например, автоматизированного комплекса для литья под давлением модели ДУ711В08, выпуск которого освоен на заводе «Сиблитмаш», г. Новосибирск.

Расширение номенклатуры сплавов для литья с наложением давления

Важным преимуществом литья с наложением давления является его универсальность по отношению к сплавам для литых заготовок. На сегодняшний день высококачественные заготовки получены из таких конструкционных материалов, как цинковые, алюминиевые, медные сплавы, углеродистые и легированные стали, жаропрочные и прецизионные сплавы на никелевой основе, сплавы на основе кобальта и титана. В частности, по заданию научно-производственной фирмы «ИНОР» (г. Москва) освоено производство заготовок для колец $\varnothing 200 \times \varnothing 120 \times 90$ мм из бронзы Бр.ОФС 12-2-2, у которой, по данным [112], $t_L = 990$ °С, $t_S = 810$ °С, т.е. интервал температур кристаллизации составляет 180 К. За счет наложения давления и глубокой пропитки междендритных пространств удалось повысить твердость до 180 НВ, в то время как при обычном литье твердость не выше 120 НВ.

Однако наибольшего внимания как материалы будущего заслуживают высокопрочные деформируемые сплавы на основе алюминия типа дюралюминов Д1, Д16, В95. В термически упрочненном состоянии эти сплавы имеют прочность и пластичность, сопоставимые со свойствами стали 45, но при плотности $2,6 \text{ г/см}^3$, высокой коррозионной стойкости, хорошей обрабатываемости и температуре плавления примерно 620 °С обладают рядом технологических, эксплуатационных, экономических, экологических и эргономических преимуществ. Тот факт, что буквально на глазах автомобильный мир меняет стальные колеса на литые из алюминиевых сплавов может служить наглядным подтверждением названных преимуществ.

Есть еще одна существенно важная особенность. Потребителем дюр-алюмина и других высокопрочных сплавов в огромных объемах является авиационная промышленность. При соответствующей отработке технологии методом переплава и последующей кристаллизации под давлением отслужившие свой срок элементы конструкций можно использовать для производства других менее ответственных изделий, но с достаточно высоким уровнем потребительских свойств. В этой связи один из аспектов общей проблемы, связанной с разработкой альтернативных технологий, – это регенерация свойств металлов с целью их многократного использования и сокращения объемов производства металлов из природного сырья.

Газы и неметаллические включения в алюминиевых сплавах

Алюминий и его сплавы в процессе плавления и литья активно взаимодействуют с газами окружающей атмосферы. Газы, попадающие в металл или сплав, образуют химические соединения, растворы или суспензии, когда молекулы газа коагулируют в пузырьки и находятся в металле (сплаве) во взвешенном состоянии. В процессе кристаллизации такого расплава на границе раздела твердой и жидкой фаз вследствие снижения растворимости возникает газовый зародыш; он удерживается там капиллярными силами и увеличивается в объеме за счет диффундирующих в него газов. При достижении определенного регулируемого краевым углом смачивания размера, когда силы отрыва газового пузырька становятся больше сил прилипания, он отрывается от твердой поверхности, стремясь вверх. Если газовые пузырьки в процессе кристаллизации не успевают подняться на поверхность расплава, то они остаются в нем, образуя в отливках газовую пористость.

Химические соединения газов с металлами являются источниками образования в сплавах твердых неметаллических включений. Газовые включения (под газовыми включениями мы понимаем и химические соединения металлов с газами) в металлах (сплавах) располагаются преимущественно по границам зерен, нарушая связь между ними и понижая прочность изделий. Растворение газов в металлах или сплавах является следствием диффузии, когда газы в зависимости от их химического сродства с металлами образуют суспензии, твердые растворы или химические соединения. Необходимо подчеркнуть значение химического состава сплава, поскольку для

простых газов степень сродства с металлами определяется положением металла в Периодической системе элементов.

По мере снижения металлических свойств металлы обнаруживают все меньшую склонность к взаимодействию с газами. То же происходит и с газами. По мере утраты металлоидных свойств они делаются все менее активными в реакциях с металлами. Так, например, образование окислов происходит с выделением большого количества тепла; нитриды в зависимости от активности металлов могут образовываться не только экзотермически, но и с поглощением тепла; образование гидридов многих металлов – эндотермический процесс. Основные факторы, влияющие на растворение газов в металлах и сплавах (помимо химической природы газов и металлов), – температура и давление. Рассматривая влияние температуры и давления, необходимо учитывать характер взаимодействия между растворенным газом и металлом. Если имеется истинное растворение, то растворимость газа C с повышением температуры возрастает:

$$C = ke^{-\frac{E_s}{2RT}},$$

где k – константа, e – основание натурального логарифма, E_s – теплота растворения, R – газовая постоянная, T – абсолютная температура.

Напротив, если происходит образование химических соединений, сопровождающееся выделением тепла, то растворимость газа с повышением температуры уменьшается [83]. Во всех случаях растворимость газа пропорциональна корню квадратному из величины парциального давления газа.

Взаимодействие газов с металлами (или сплавами) складывается из трех последовательных процессов: адсорбции, диффузии и растворения (или абсорбции). Адсорбция, диффузия и растворение газов металлами и сплавами являются подготовительными стадиями химических реакций. Газы, склонные к химическим реакциям, обладают способностью к активированной адсорбции металлами (сплавами) и способностью диффундировать и растворяться в металлах (сплавах).

В алюминии и его сплавах обнаружено преимущественное присутствие водорода и кислорода в виде оксидов. Растворимость водорода изучена мало. Однако известно, что в сплаве Al + 3 % Cu содержание водорода составляет 1,5 см³/100 г, в то время как в чистом алюминии при том же давлении $p_{H_2} = 760$ мм рт.ст. растворяется 1,9 см³/100 г. Отмечается также пони-

жение растворимости водорода в системах Al – Si и Al – Mn по сравнению с чистым алюминием, в то же время в сплавах Al – Mg при содержании Mg до 5 % растворимость водорода может достигать $2,9 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ [107]. Кислород находится в алюминии в виде оксида Al_2O_3 , азот – в виде нитрида Al_2N_3 , углерод – в виде карбида Al_4C_3 .

На содержание H_2 и O_2 в алюминиевых сплавах оказывает влияние влага, удерживаемая оксидной пленкой ($\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$) даже при длительной выдержке жидкого металла. Предварительная прокатка шихты при $700 \text{ }^\circ\text{C}$ способствует снижению содержания водорода и кислорода, однако необходимо иметь в виду, что при хранении шихты во влажной среде на поверхности возможно образование гидратов, при прокаливании которых образуется рыхлый глинозем. Рыхлый оксид легко разрывается и замешивается в металл. Примеси окиси алюминия и водорода в расплаве сопутствуют друг другу, образуя комплекс $n(\text{Al}_2\text{O}_3) - m(\text{H}_2)$.

Наиболее распространенными методами снижения содержания газов в алюминиевых сплавах являются продувка хлором, рафинирование, обработка хлоросодержащими дегазерами. Однако хлор, будучи замешанным в металл, может неожиданным образом выходить в атмосферу в процессе механической обработки отливок, что по критерию ПДК является недопустимым.

Из других методов, например, O_2 -процесс, вакуумное литье, электрошлаковый переплав, вакуумно-дуговой переплав и другие, наиболее привлекательным для использования при производстве фасонных отливок является вакуумирование в процессе заполнения формы.

Математическое описание процесса массопереноса водорода через поверхность раздела фаз при вакуумировании может быть представлено следующим образом [113]:

$$dG = A\beta_{\text{ж}}(C_{\text{ж}} - C_{\text{ж.г}})d\tau, \quad (36)$$

где dG – количество молей водорода; β – коэффициент массопереноса водорода в металле, см/с; $C_{\text{ж}}$ – концентрация водорода в расплаве; $C_{\text{ж.г}}$ – концентрация водорода в расплаве, находящемся в равновесном состоянии с давлением газа (вакуум в полости формы) $p_{\text{ж.г}}$ на поверхности раздела фаз; τ – время.

Аналогично можно показать, что перенос водорода от границы раздела фаз в газовой фазе описывается уравнением

$$V_{\text{ж}} dC_{\text{ж}} = A\beta_{\text{г.ф}}(C_{\text{ж.г}} - C_{\text{г}})d\tau, \quad (37)$$

где $\beta_{\text{г.ф}}$ – коэффициент массопереноса через границу раздела фаз.

В свою очередь перенос водорода от границы раздела в газовой фазе происходит согласно уравнению

$$V_{\text{ж}} dC_{\text{ж}} = A\beta_{\text{г}}(C_{\text{ж.г}} - C_{\text{г}})d\tau, \quad (38)$$

где $\beta_{\text{г}}$ – коэффициент массопереноса в газовой фазе, см/с.

Перенос водорода из расплава через границу раздела фаз можно рассматривать как результат двух противоположных, одновременно протекающих процессов десорбции и адсорбции газа. Константы реакций этих процессов неодинаковы, поэтому суммарный процесс может быть описан уравнением

$$V_{\text{ж}} dC_{\text{ж}} = \beta_{\text{ж}}(K_{\text{д}}C_{\text{ж.г}} - K_{\text{а}}C_{\text{ж.г}})d\tau, \quad (39)$$

где $K_{\text{д}}$ – константа процесса десорбции; $K_{\text{а}}$ – константа процесса адсорбции.

Отношение констант процессов адсорбции и десорбции в условиях гетерогенного равновесия в системе металл – газ равно отношению равновесных концентраций газа в металле и газовой фазе и характеризуется коэффициентом распределения L :

$$\frac{K_{\text{а}}}{K_{\text{д}}} = \left(\frac{C_{\text{ж}}}{C_{\text{г}}}\right)_{\text{р/г}} = L.$$

Этот коэффициент связан с константой Сиверса следующим соотношением:

$$L = k_{\text{р}}RT / 100Mf^2C_{\text{р}}, \quad (40)$$

где ρ – плотность, г/см³; R – универсальная газовая постоянная, Дж/К·моль; T – абсолютная температура, К; M – молекулярная масса газа; f – коэффициент активности газа в металле; $C_{\text{р}}$ – равновесная концентрация газа в металле, % (масс);

Совместное решение уравнений (37) и (39) позволяет получить дифференциальное уравнение, описывающее общий ход процесса дегазации металла в вакууме:

$$V_{\text{ж}} dC_{\text{ж}} = A\beta(C_{\text{ж}} - LC_{\text{г}})d\tau, \quad (41)$$

где β имеет смысл суммарного коэффициента массопереноса процесса дегазации. Можно записать

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta_{\text{ж}}} + \frac{1}{K_{\text{д}}} + \frac{L}{\beta_{\text{г}}}, \quad (42)$$

где $\frac{1}{\beta}$ – характеризует величину сопротивления процессу дегазации, которое складывается из сопротивления переносу газа в металле, сопротивления переходу газа через поверхность раздела фаз и сопротивления переносу газа от поверхности раздела фаз в газовую среду.

Скорость дегазации $dC_{\text{г}}/d\tau$ при прочих одинаковых условиях пропорциональна разности текущей концентрации газа в металле и концентрации, находящейся в равновесии с концентрацией газа в газовой среде. Интенсивный отсос газа при вакуумировании смещает равновесие в сторону меньших концентраций газа в металле. Кроме того, интенсивность газоподобия зависит от пути диффузии газа в металле. Вакуумирование печной атмосферы в этом смысле менее эффективно, так как газовым включениям необходимо преодолеть значительную толщину жидкого металла. Эффект газоподобия можно повысить, изменяя соотношение между поверхностью металла и его объемом.

Выше в табл. 1 показано, что при прочих одинаковых условиях рафинирование силумина с последующим вакуумированием способствует снижению пористости, повышению прочности, твердости и пластичности.

Управление вакуумированием металла

Совместить в одном технологическом комплексе выплавку и наложение давления в вакууме и при этом на деталях газотехнического назначения обеспечить высокую производительность не представляется разрешимой задачей, поэтому были разработаны способы, защищенные патентами [114, 115], предусматривающие перед наложением давления вакуумирование металла непосредственно в процессе заполнения формы.

Схематически на функциональной схеме (см. рис. 25) представлено, что металл заливается в чашу 1, в это время плунжер правый 7 перекрывает отверстие, которое сообщается с вакуумной системой. В следующий момент плунжер 7 отводится вправо и в полости формы возникает разрежение. При растекании металла в камере опрессовки 3, а затем и в полости формы 4 происходит не только увеличение открытой поверхности металла, но и его перемешивание, при котором согласно зависимости (42) выход газов из металла и их утилизация вакуумной системой по сравнению с вакуумированием в плавильной печи многократно усиливаются.

Важное значение приобретают характер движения металла – ламинарный или турбулентный, состав газов, взаимодействие металла с кислородом – так называемое вторичное окисление.

Регулирование скорости откачки воздуха и газов показано на рис. 29.

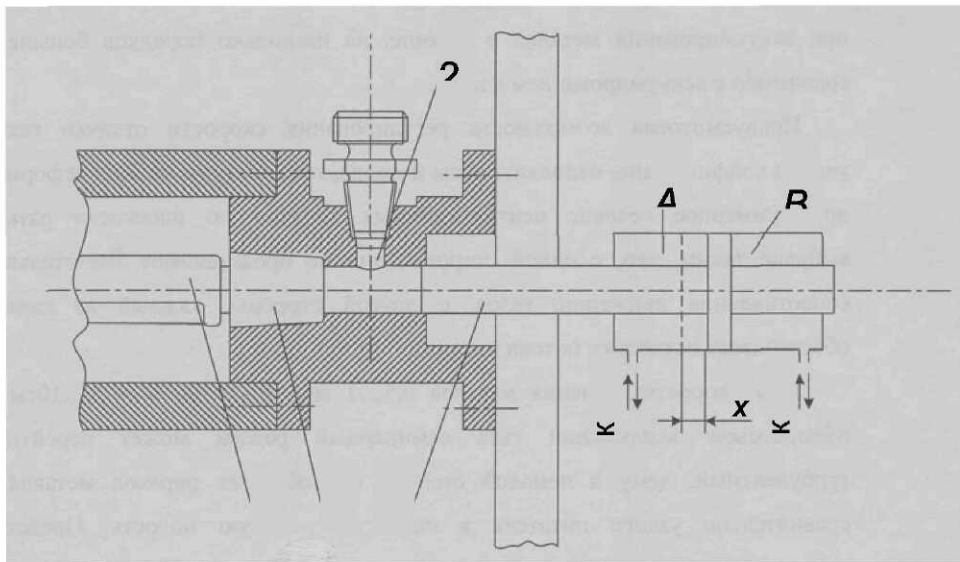


Рис. 29. Схема управления вакуумированием

Процесс вакуумирования может быть представлен следующей зависимостью [116]:

$$dp = \frac{4}{3} n \mu \frac{RTS}{V^2} \sqrt{\frac{2}{\rho}} (p - p_6) dt, \quad (43)$$

где n – показатель политропы; ρ – плотность металла; μ – коэффициент расхода; V – объем полости штампа; T – температура штампа; p – начальное давление; p_6 – остаточное давление в бустере, $S = f(x)$ – площадь проходного сечения в вакуумной магистрали, зависит от положения штока 1, который с помощью гидроцилиндра перекрывает отверстие 2.

Физика явлений, связанных с вакуумированием и дегазацией, достаточно сложная, а управление процессом необходимо осуществлять в режимах, когда случайное изменение одного из параметров процесса может привести к потере устойчивости. Это тот самый случай, когда система управления должна обладать избыточностью с точки зрения информационного обеспечения для накопления и производства знаний о самом процессе.

Для управления скоростью откачки газов из полости формы, как видно из рис. 29, необходимо отработать функцию $S = f(x)$, где $x = \varphi(\tau)$ – закон перемещения штока 1.

Потоки информации при управлении вакуумированием показаны на функциональной схеме (см. рис. 25). Для контроля и регулирования координаты x использован датчик 10 с дифференциальным индуктивным преобразователем. Измерение давления в полости K, J гидроцилиндра 14 осуществляется тензометрическими датчиками мембранного типа, МД-150Т (позиция 8). Датчик температуры 13 представляет собой термопару K -типа (хромель – алюмель) с фильтром и усилителем сигнала. Более подробная информация о датчиках приведена в работе [109].

Обработка информации, снимаемой с датчиков, осуществляется в соответствии с алгоритмом (рис. 30).

Программа позволяет:

- осуществлять управление комплексом как по гибкой, так и по жесткой схеме;
- выбрать оборудование или привод, который будет использован в эксперименте, например, контрплунжер при литье с двухсторонним сжатием, вакуумное оборудование при литье с вакуумированием;
- использовать данные и настройки предыдущих экспериментов, так как настройки и данные каждого эксперимента сохраняются на жестком диске;
- конвертировать данные для дальнейшей их передачи и обработки, а также их распечатать;
- осуществлять тарировку датчиков.

На первом этапе работы с программой необходимо решить, будет ли проведен новый эксперимент или можно воспользоваться данными экспериментов ранее проведенных и сохраненных на жестком диске. Это выбирается в разделе «Эксперимент» меню программы. В этом разделе есть

также возможность сохранить данные на диске после проведения эксперимента и распечатать полученные графики на принтере.

На втором этапе выбирается пункт меню «Программирование», который, в свою очередь, подразделяется на разделы:

- оборудование комплекса...;
- программа ...;
- тарировка системы....

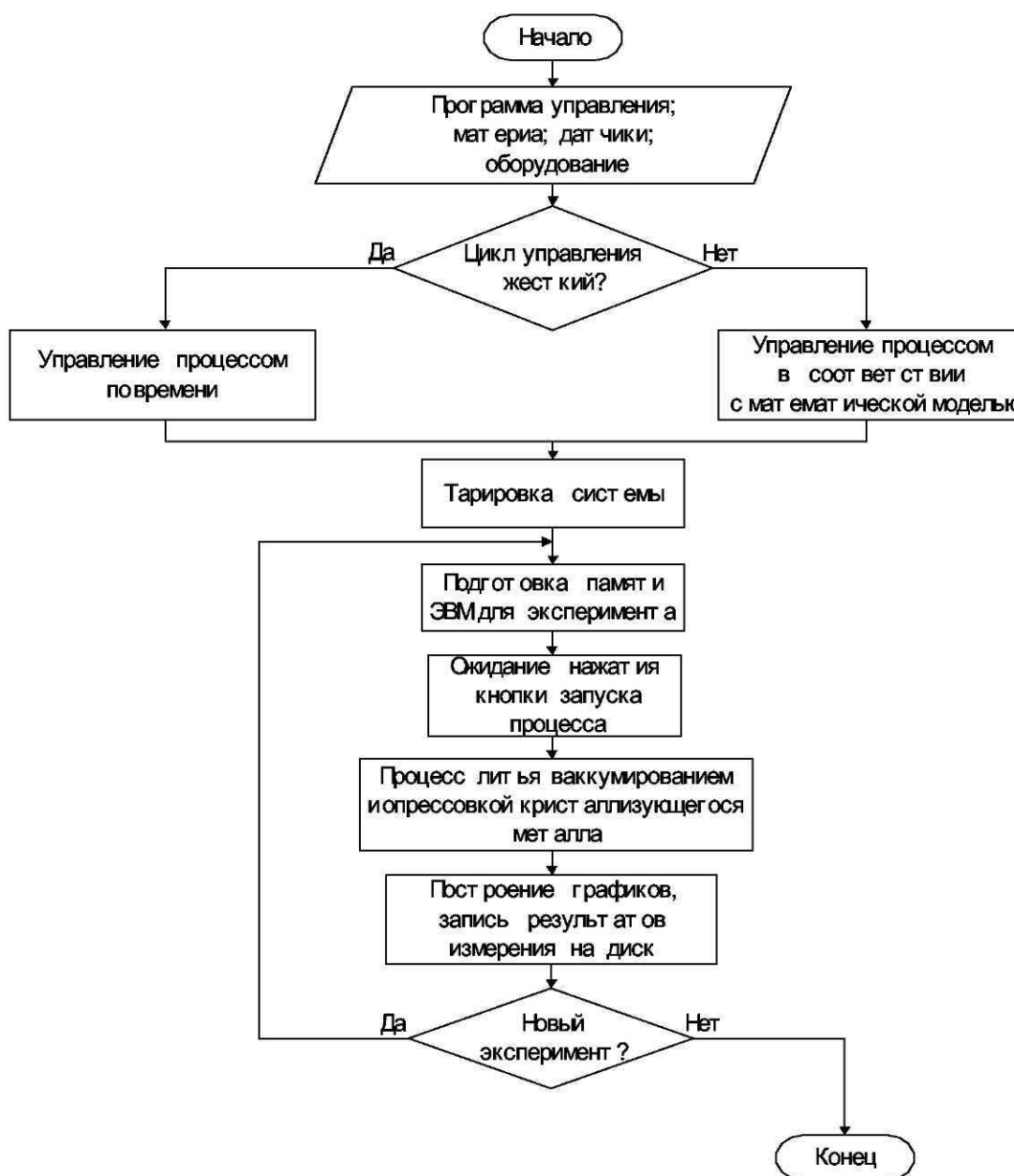


Рис. 30. Укрупненная блок-схема алгоритма работы программно-аппаратного комплекса

В разделе «Оборудование комплекса...» выбираются исходные данные для конкретного эксперимента: наименование эксперимента, материал, время технологического процесса литья с наложением давления, тип циклограммы управления, датчики и оборудование, используемое в данном эксперименте.

Раздел «Программа...» является основным пунктом. С учетом выбранного оборудования, датчиков и типа циклограммы управления пишется программа управления процессом:

1. Гидронасос:	0b00000000	0b00000011	время, мс.
2. Гидроцилиндр плиты:	0b00001100	0b00000000	время, мс.
3. Клапан:	0b00000000	0b00001100	время, мс.
4. Мультипликатор:	0b11000000	0b00000000	время, мс.
5. Плунжер 2:	0b00110000	0b00000000	время, мс.
6. Плунжер:	0b00000011	0b00000000	время, мс.

В целях осуществления метрологической аттестации датчиков предусмотрен раздел программы «Тарировка».

Наряду с вакуумированием необходимо также управлять наложением давления. Возвращаясь к схеме на рис. 25, можно представить, что в момент, когда поток металла дойдет до правой камеры опрессовки 6, движением плунжера 7 влево отверстие, сообщающееся с вакуумной системой, перекрывают, а при дальнейшем перемещении плунжеров 2 и 7 навстречу друг другу металл запрессовывается в полость формы. Это этап формообразования заготовки. В следующий момент плунжеры 2 и 7, преодолевая сопротивление кристаллизующегося металла, входят соответственно в полости 3 и 6, в которых и накладывается требуемой величины давление на жидкий и кристаллизующийся металл. Как уже отмечалось выше, слишком быстрое наложение давления может привести к потере устойчивости, так как металл остановится до того момента, когда теплота перегрева и скрытая теплота кристаллизации будут аккумулированы формой.

Идеальным можно считать управление, когда темп кристаллизации известен и за каждый фиксированный отрезок времени плунжеры впредссыывают внутрь отливки такой объем металла, какой необходим для компенсации усадки металла, закристаллизовавшегося за тот же самый отрезок

зок времени. Однако ни аналитически, ни экспериментально зафиксировать объем закристаллизовавшегося металла не представляется возможным.

Аналогичные проблемы возникают и при автоматизации процессов резания. Случайное увеличение припуска на обрабатываемой поверхности фиксируется по упругой деформации инструмента. Этот сигнал используется для коррекции величины подачи. В результате температурные режимы обработки стабилизируются, но необходимость в измерении температуры в зоне обработки отпадает. В процессе штамповки переменными параметрами являются температура штампа, температура заготовки, сопротивление металла деформированию и др. Система управления, точнее информационно-измерительная подсистема, собирает информацию и на основе анализа и сравнения назначает соответствующую скорость деформирования.

Общим для рассмотренных примеров является программирование того или иного технологического воздействия с учетом реально сложившейся ситуации. Системы управления этого класса принято обозначать «*PC-Swage Master*» или системы адаптивного упреждающего управления технологическим процессом. Они могут быть с обратной связью и без обратной связи, а также с обратной связью с запаздыванием на один или несколько циклов обработки.

Определение скорости охлаждения металла на фронте кристаллизации представляет собой достаточно трудоемкий измерительный и вычислительный процесс. И даже, если динамические характеристики процесса обеспечивают требуемую скорость нагружения и запрессовку достаточного количества металла, устойчивость управления может быть потеряна по причине запаздывания сигнала обратной связи. Поэтому наряду с традиционными подходами, обеспечивающими регулирование и управление входными параметрами с учетом значений и рассогласований на выходе, возникает необходимость в создании альтернативных технологических процессов, восприимчивых к коррекции и автоматической настройке. Необходимо на стадии разработки технологии предусмотреть наиболее эффективные приемы и энергетические воздействия, чтобы с минимальным числом переходов и установок получить готовое изделие.

В этом смысле литье с наложением давления и представляет собой процесс, в котором по сравнению, например, со штамповкой изделие достаточно сложной формы может быть получено за один технологический переход – жидкий металл без каких-либо внешних усилий заполняет полость формы.

Возможность выхода на требуемый режим наложения давления в течение 3 – 5 пробных заливок может быть реализована путем разработки гибкой самонастраивающейся программы.

Ранее говорилось о том, что на каждом временном интервале необходимо создавать определенное давление и обеспечивать запрессовку металла на компенсацию усадки.

Если давление в гидросистему подавать короткими импульсами, как это показано на рис. 21, следящую систему можно запрограммировать на постепенное от одного цикла заливки к другому увеличение продолжительности подачи давления и соответствующее сокращение длительности пауз. Вначале будет происходить увеличение объема запрессовываемого металла, вызванное увеличением давления. Но при достижении определенной частоты включений дальнейшее повышение давления приводит к снижению плотности отливок. В соответствии с программой система запоминает оптимальные значения частоты и поддерживает их в последующих циклах. Случайные отклонения и внешние возмущения могут изменить установленное значение хода плунжера на запрессовку металла. Тогда система либо возвращается к поиску, либо реагирует на помехи в реальном времени, используя ресурсы, занесенные в базу исходных данных.

Разработанная система испытана на отливках для изделий газотехнического назначения.

3.3. Разработка схемы процесса и проектирование технологической оснастки

В качестве характерных представителей деталей газотехнического назначения по заданию фирмы «Джет», г. Ижевск были выбраны «Ствол» –

корпус кислородно-ацетиленового резака из дюралюмина Д16 и «Вентиль газовый» из латуни ЛС59-1. Модели отливок и их чертежи приведены на рис. 31–34.

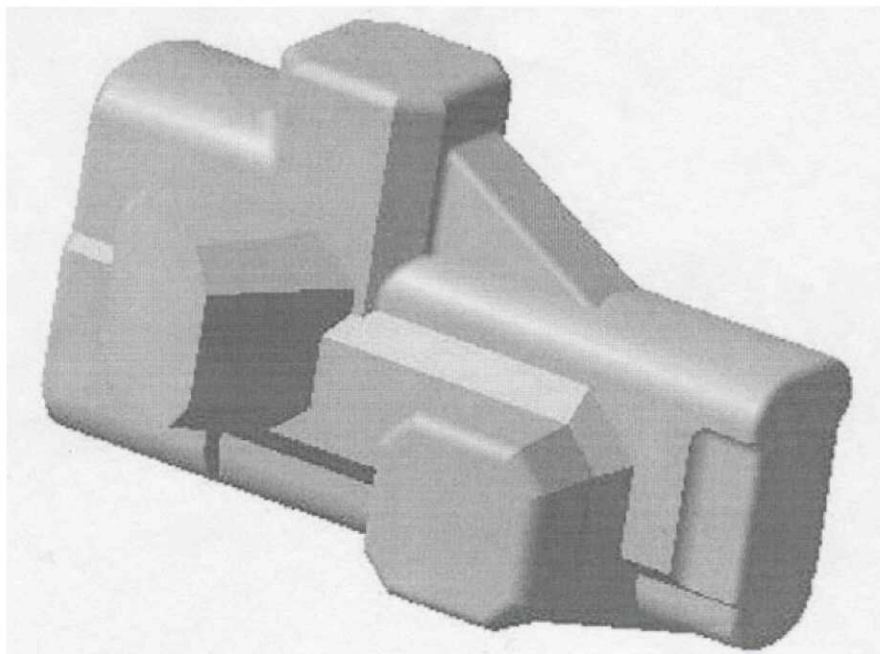


Рис. 31. 3D-модель отливки «Свол»

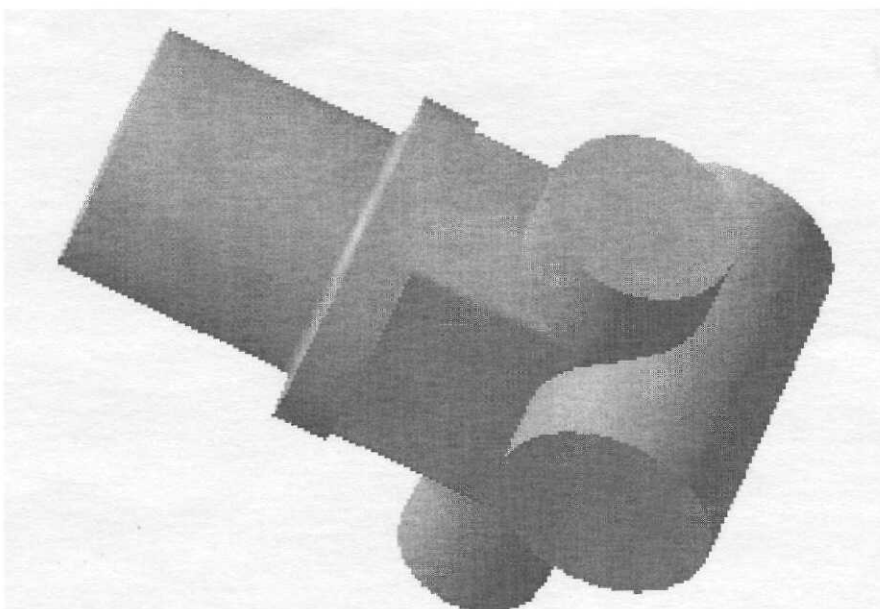


Рис. 32. 3D-модель отливки «Вентиль газовый»

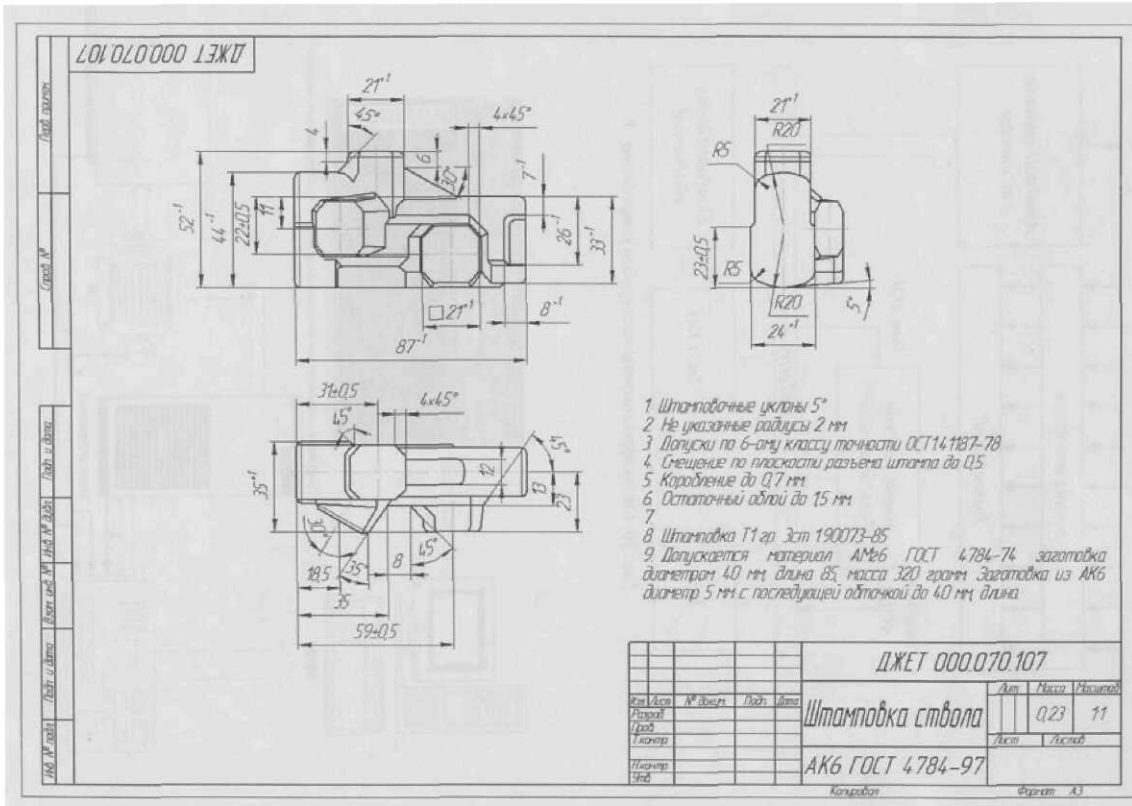


Рис. 33. Чертеж отливки «Ствол»

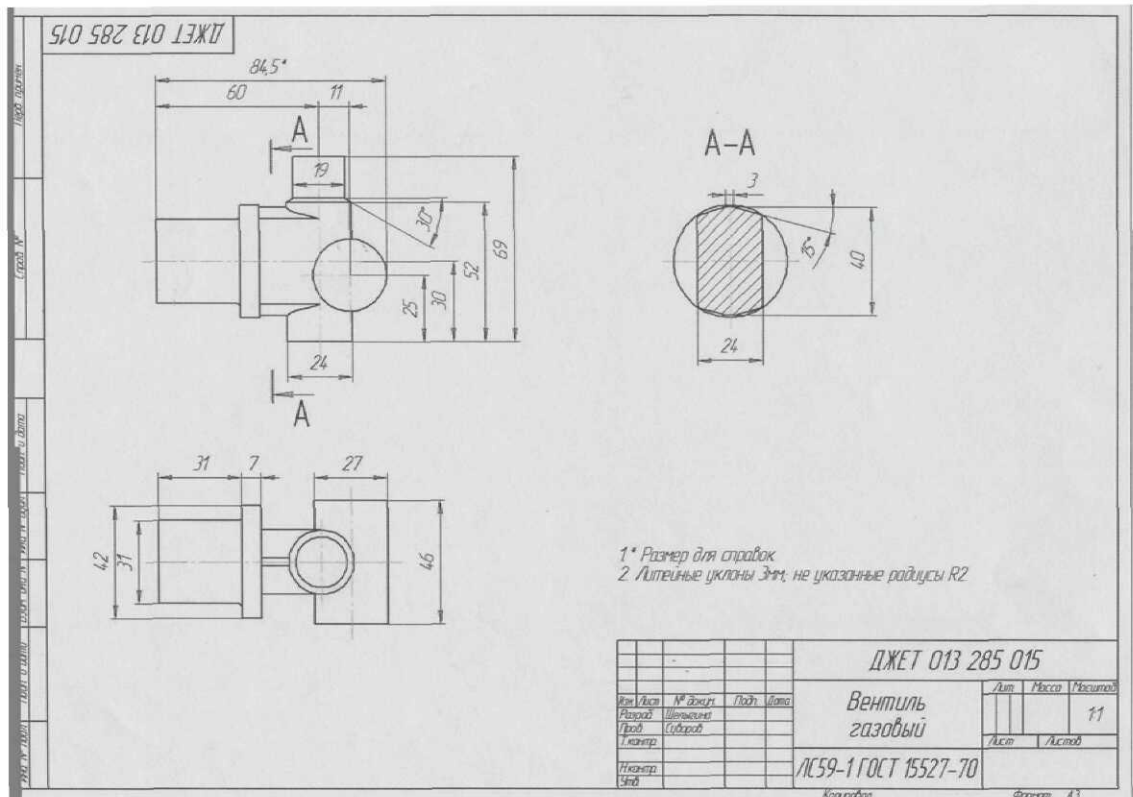


Рис. 34. Чертеж отливки «Вентиль газовый»

Технологическая оснастка в соответствии со схемой на рис. 35 выполнена в виде штампа из двух асимметричных частей, в каждой из которых есть универсальный набор и специальные вкладыши, обозначенные позициями 1 и 2. Матрицы 3 и 4 входят в универсальный пакет и выполняют роль контейнера. Важную роль играют камеры прессования 5 и 6. Упоры 7 и 8 заполняют пространство между вкладышами и плитами пресса. Пресс-плунжеры 9 и 10 предназначены для наложения давления на кристаллизующийся металл. Заливочная чаша 11 используется как промежуточная емкость во время заполнения полости штампа жидким металлом через отверстие 14. Кольцо 12 используется как защитное на случай прорыва металла по плоскости разъема. В то же время в кольцо установлен штуцер 13, подсоединенный через электромагнитный клапан к вакуумной системе. Для отвода газов из полости штампа по полости разъема профрезерованы вентиляционные каналы. Заливочное отверстие может быть перекрыто плунжером 14. Металл непосредственно в форму поступает через широкий питатель 15, а его опрессовка происходит в камерах 16.

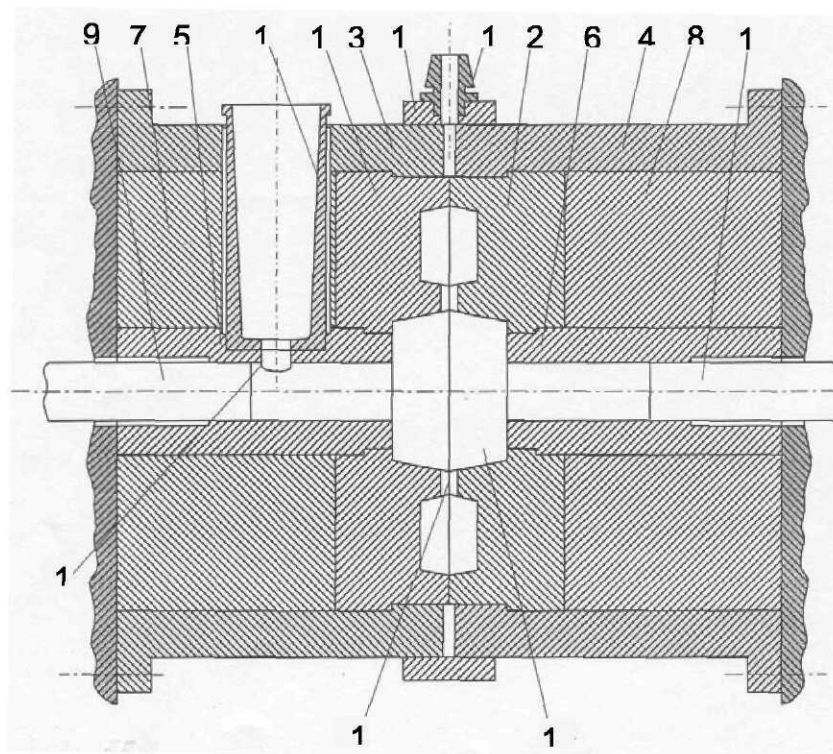


Рис. 35. Схема процесса литья с вакуумированием и опрессовкой кристаллизующегося металла

Пресс-плунжер перекрывает заливочное отверстие, после заполнения чаши 11 подается команда на запуск программы, в соответствии с которой пресс-плунжер отводится влево, открывает заливочное отверстие. В это же время открывается электромагнитный клапан, происходит соединение полости формы с полостью вакуумного ресивера объемом $0,6 \text{ м}^3$, в котором поддерживается остаточное давление, равное примерно 25 МПа.

Благодаря вакуумированию течение металла по каналам и в полости формы происходит с более высокой скоростью.

3.4. Производство опытной партии отливок

Отливки типа «Ствол»

Заготовки для рукояток ацетилено-кислородного резака в связи с высокими требованиями к плотности и герметичности проходят 100%-й рентгеновский контроль на отсутствие газовых раковин и пор.

Предложенная последовательность выполнения технологических переходов (см. рис. 35) включает заливку металла в чашу 11, который через отверстие 14 перетекает в полость формы, вакуумирование металла во время заполнения формы, перекрытие заливочного отверстия плунжером 9, движение плунжеров 9 и 10 навстречу друг другу, при котором металл в замкнутой полости четко воспроизводит конфигурацию внутренней поверхности формы, последующее внедрение плунжеров в камеры 16, наложение давления и передавливание металла через массивные питатели внутрь отливок. Благодаря соответствующей компоновке прессы ПЛД-300 впервые удалось осуществить двухстороннее сближение плунжеров, которое обеспечило эффективную пропрессовку отливок в многоместной форме. Принципиальное значение имеет управление скоростью откачки газов и движением плунжеров. Показания датчиков перемещения плунжеров, изменения давления рабочей жидкости в гидросистеме и других параметров на этапе отработки управляющей программы записываются в память персонального компьютера и используются для построения соответствующих графиков и зависимостей (рис. 36).

Для данной отливки характерными дефектами являются газовые раковины, поры, неблагоприятная неоднородная структура. При сочетании параметров $t_{\text{зал}} = 750 + 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_2^0 = 230 \pm 5^{\circ} \text{ C}$, при диаметре заливочного отверстия 14 $d = 35 \text{ мм}$ и размерах формообразующих вкладышей (рис.37), наложение давления 450...500 МПа и выдержка под давлением в течение

15...20 с обеспечивают стабильные результаты и соответствие требованиям, предъявляемым к установочной партии примерно 200 отливок.

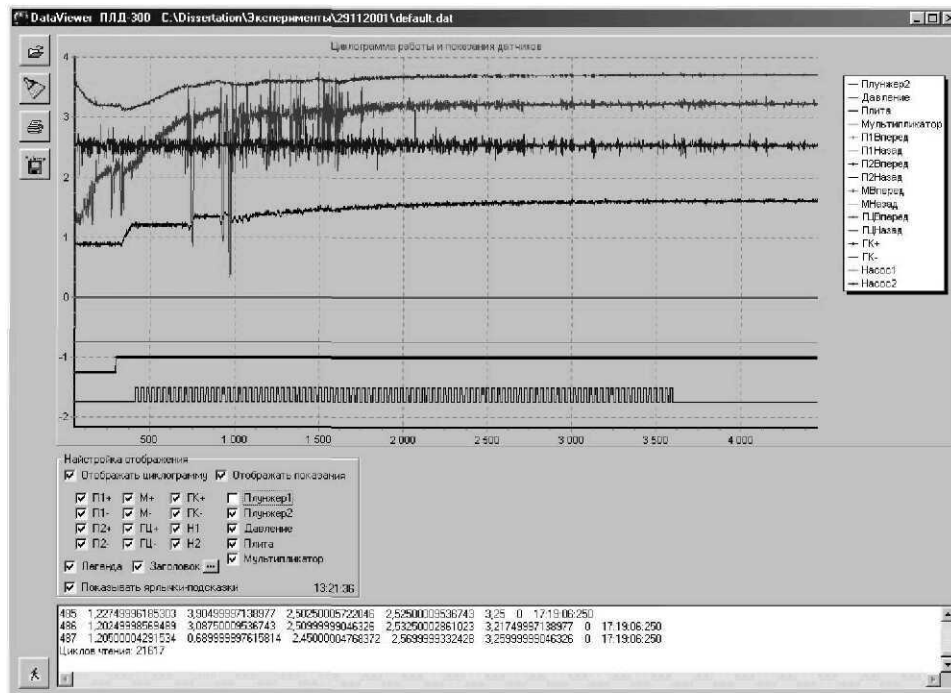
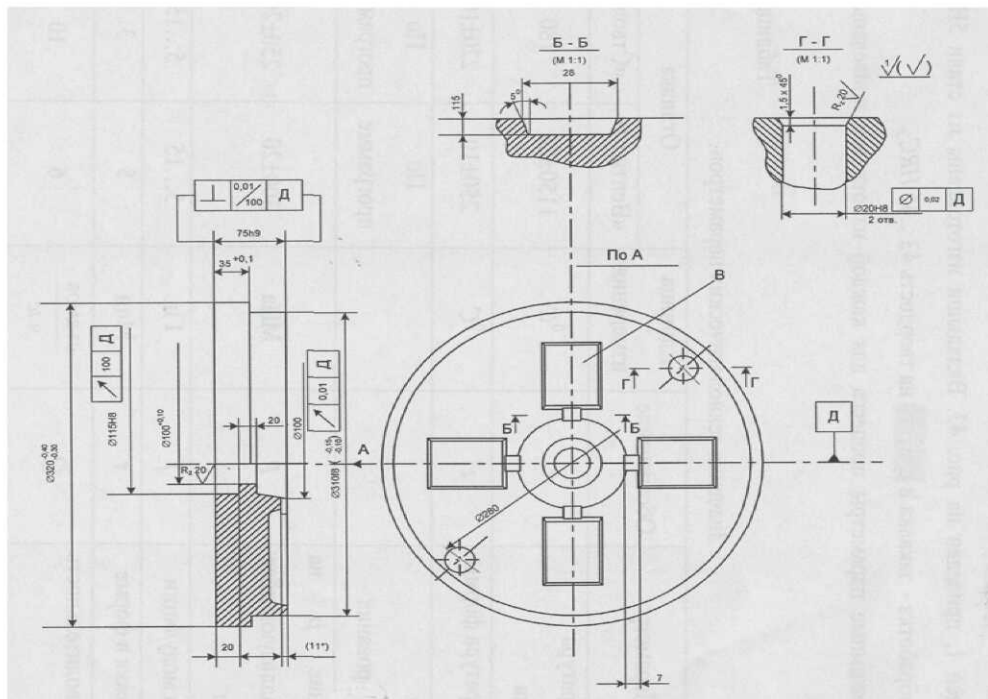


Рис. 36. Запись изменения параметров процесса



Материал: Сталь 5ХНМ
Твердость: 43...45 HRC₃

Рис. 37. Чертеж формообразующего вкладыша

Вентиль из латуни ЛС59-1

По серийной технологии заготовки получают штамповкой, причем исходной перед штамповкой заготовкой служит кокильная отливка или прокат.

По плотности, герметичности, обрабатываемости резанием и прочностным свойствам литые заготовки должны быть идентичны штампованным. Но в связи с конкуренцией и ростом тарифов на энергоносители особыми требованиями *Заказчика* являются максимально высокая производительность и минимальные потери металла.

За основу при проектировании технологической оснастки принята схема, представленная на рис. 35. Режимные параметры процесса отливок приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры процесса

Параметр	Обозначение	Отливка «Вентиль»
Температура металла, °С	$t_{\text{зал}}$	1150 \pm 20
Температура формы, °С	t_2^0	250 \pm 10
Режим вакуумирования	—	По программе
Давление на кристаллизующийся металл, МПа	p	300 \pm 20
Режим модуляции, Гц	f	5...15
Выдержка в форме, мин	τ	5
Покрытие формы	-	Кокильная краска
Производительность, съёмов/ч	Q	6

Апробация штампов с четырехместными вкладышами и системой вакуумирования показала, что в первую очередь на новый процесс целесообразно с экономической и технологической точек зрения переводить детали типа «Вентиль», которые благодаря наличию уклонов можно извлекать из рабочей полости в горячем состоянии. Выше обращалось внимание на то, что наложение давления из-под корки закристаллизовавшегося

металла приводит к исчезновению зазора между отливкой и формой. Поэтому увеличенные уклоны в используемой оснастке по аналогии со штампами для горячей объемной штамповки в полной мере решают проблему извлечения отливки из формы.

Изготовленный штамп показан на рис. 38, а полученные отливки – на рис. 39.

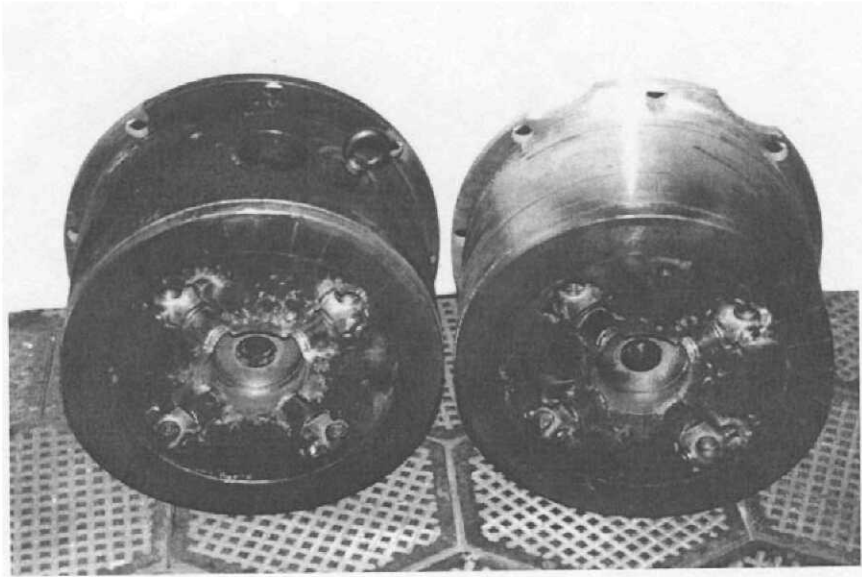


Рис. 38. Штамп для отливки типа «Вентиль»

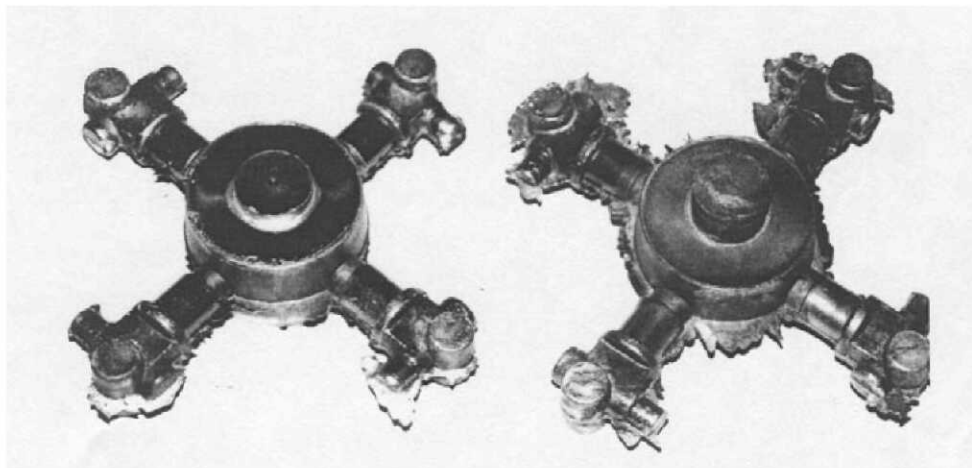


Рис. 39. Опытные отливки

Изготовленная установочная партия (примерно 200 отливок) прошла контроль на отсутствие дефектов. Разработанный процесс принят к использованию в серийном производстве.

Экономическая эффективность от использования разрабатываемого процесса в промышленности определяется следующими факторами:

1) отсутствует металлургическая передел. В качестве исходных материалов могут быть использованы те же детали, прошедшие полный жизненный цикл; после переплава и кристаллизации в условиях регулируемых внешних динамических воздействий металл не только приобретает необходимую форму, но и регенерирует (восстанавливает) свойства;

2) весь производственный процесс зависит от информационного обеспечения и взаимного слияния технологических идей с достижениями автоматизированного проектирования, информационных технологий, интегрированных компьютерных систем управления, обеспечивает переход морально и физически устаревших технологий на уровень высоких технологий межотраслевого применения.

Конкретными параметрами и характеристиками продукции, получаемой с использованием разрабатываемой технологии, являются:

- плотность и герметичность под давлением 40 МПа и более;
- коэффициент использования металла 0,8...0,9 против 0,2...0,3 по существующим технологиям;
- длительность производственного цикла на одно изделие от 30 до 90 мин против 500...600 мин по серийным технологиям;
- затраты электроэнергии 2...2,5 кВт/ч на одно изделие вместо 5...6 кВт/ч по обычной технологии;
- высокая экологичность, отсутствуют вредные выбросы в почву и в атмосферу;
- внедрение процесса связано со значительными капитальными вложениями, однако в условиях межотраслевой кооперации и специализации производства срок окупаемости первоначальных затрат не превышает шести месяцев.

Назрела настоятельная необходимость от практики истощения природных ресурсов переходить к строго сбалансированной и согласованной по требованиям качества и экологичности концепции многократного использования материалов по их целевому назначению без значительных затрат новых ресурсов.

Одним из направлений реализации указанной концепции, как видно из представленных материалов, являются разработка высокоэффективных процессов и концентрация энергетических воздействий на самых ранних

этапах технологии, когда металл из жидкого состояния переходит в кристаллическое.

В основу дальнейших исследований и разработок можно положить следующие результаты и достижения выполненной работы:

1. Современное состояние теории и технологии производства металлопродукции пришло в явное несоответствие с требованиями по ресурсосбережению, улучшению условий труда, защите экологии.

2. Характерные дефекты литых изделий и заготовок – газовые раковины, ликвация, усадка, внутренние напряжения, трещины – могут быть устранены путем вакуумирования металла в форме и наложения давления на металл, однако автоматизированное управление процессами в оптимальных режимах затруднено из-за отсутствия информации о закономерностях сложных физических явлений, связанных с поведением газов при вакуумировании и формировании структуры при наложении давления.

3. Системы управления высокоэнергетическими производственными процессами в отсутствие информации о переходных процессах, границах устойчивых состояний, синергетических эффектах охлаждения и нагружения необходимо проектировать с избыточными возможностями по сбору, анализу и использованию информации о параметрах технологии, о внешних возмущениях для обеспечения функционирования этих систем в режиме накопления информации о процессе.

4. Информационное и программно-аппаратное обеспечение производственных технологических комплексов предоставляет в распоряжение пользователей качественно более высокие возможности проверки рабочих гипотез, отработки оптимальных режимов, обучения студентов и производственного персонала.

5. Достигнутые показатели свойств литых деталей газотехнического назначения заведомо превышают достигнутый уровень наилучших отечественных и зарубежных аналогов, что следует расценивать как объективный критерий привлекательности для инновационных и инвестиционных проектов.

Глава 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЛИТЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДИСКОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Дальнейший прогресс в развитии транспортных средств в значительной степени зависит от уровня и степени совершенства технологических процессов, используемых при их производстве.

Автомобильные диски (далее диски) представляют собой тот самый ответственный элемент конструкции, который сегодня определяет динамические характеристики, долговечность, надежность, экономичность и экологичность автомобиля. Несмотря на высокие достижения в создании заменителей обычных стальных штампованных дисков, даже лучшие из них, такие как титановые, штампованные из алюминиевых сплавов, литые из магниевых сплавов не в полной мере отвечают постоянно растущим требованиям по точности балансировки, имеют неоправданно большую массу, а их производство обходится дорого. На рынке сложилось перепроизводство дисков, которые по критерию *качество/цена* являются недоступными для массового покупателя. Поэтому цель работы и задачи исследований сводились к поиску таких вариантов технологии, которые при более низких затратах на производство обеспечивали требуемое качество дисков.

При выполнении исследований использован автоматизированный технологический комплекс, оснащенный средствами для вакуумирования жидкого металла, запрессовки металла в полость формы и наложения высокого давления на металл в процессе его кристаллизации. Кроме того, комплекс, в состав которого входят программно-аппаратные средства для сбора и обработки экспериментальной информации, может работать в режиме супервизорного управления по программе, составленной с учетом достигнутого опыта и результатов, полученных в предыдущих экспериментах.

Значительное внимание уделено анализу циклограмм, записанных по показаниям соответствующих датчиков. Варьирование условиями проведения экспериментов позволило проследить и установить важные закономерности поведения жидкого металла под давлением. В развитие ранее выполненных исследований, в которых изучены вопросы, связанные с формообразованием фасонных изделий из бесформенной массы расплавленного металла, поведение металла под давлением рассматривается сквозь призму усадки и формирования структуры кристаллизующегося металла.

Установлено, что динамические характеристики имеющегося оборудования не в полной мере соответствуют требуемым гидродинамическим режимам заполнения, не обеспечивают наложение давления до начала кристаллизации расплава.

В процессе выполнения исследований вместо деформируемого алюминиевого сплава В95 был подобран литейный сплав АЛ246 с более узким интервалом ликвидус – солидус и более низкой температурой плавления, для снижения интенсивности теплового взаимодействия расплава с формой вместо смазки на поверхность формообразующих вкладышей предложено наносить слой краски.

Анализ циклограмм позволил установить численное значение сжимаемости жидкого металла, которое при давлении 0,5...1,0 МПа достигает 10 %. Рассчитано значение энергии и определен интервал времени, в течение которого эта энергия должна быть затрачена для эффективного наложения давления и опрессовки кристаллизующегося металла.

Разработанные рекомендации по совершенствованию процесса позволили успешно завершить этап поисковых исследований, подготовить установочную партию опытных отливок и удостовериться в соответствии их качества предъявляемым требованиям. Для перевода исследований в стадию опытно-конструкторской разработки создана конструкторская документация на модернизацию пресса и технологической оснастки.

4.1. Оценка возможности замены штампованных дисков литыми

Благодаря достижениям в области разработки новых материалов традиционные штампованные стальные диски постепенно отходят на задний план и их место на рынке все более уверенно завоевывают литые диски преимущественно из алюминиевых сплавов.

Немалую роль в конкуренции дисков сыграла дизайнерская проработка. Алмазная обточка алюминиевых сплавов в сочетании со стойкими лаковыми покрытиями придают алюминиевым дискам привлекательный вид, выгодно гармонирующий с дизайном современных высококлассных автомобилей. Уместно также отметить высокую коррозионную стойкость и общее уменьшение массы колес, что весьма актуально для улучшения качества дорог, повышения динамичности и устойчивости автомобилей.

В настоящее время автомобили уверенно преодолевают скоростной барьер 100 км/ч и с каждым годом для широкого круга и профессионалов, и автолюбителей как на иномарках, так и на отечественных автомобилях освоенный диапазон средних скоростей на протяженных отрезках автодорог увеличивается и в ближайшие годы составит 130...150 км/ч. В этих условиях снижение массы колеса, обеспечение его динамической балансировки за счет геометрической точности по важности выдвигаются на передний план.

С повышением скорости неизбежно и не в линейной, а в степенной зависимости возрастают требования по обеспечению безопасности движения автомобиля. И здесь алюминиевые сплавы как обладающие более благоприятным сочетанием теплопроводности и теплоемкости по сравнению с другими материалами позволяют повысить эффективность тормозов благодаря более интенсивному отводу тепла от тормозных колодок, дисков, барабанов, суппортов.

Вместе с тем необходимо признать, что к началу 2003 года, когда уже накоплена определенная статистика по легкосплавным дискам, развеялись иллюзии относительно экономии топлива, увеличения срока службы шин, равно как и не столь устрашающими стали опасения, связанные с возможностью хрупкого разрушения при ударе о бордюр, при езде на спущенной шине и т.д. Нарбатывается опыт шиномонтажа, закрепления балансировочных грузиков, сохранения лакового покрытия.

На этом этапе вправе предположить, что в условиях рыночной конкуренции сформировался определенный баланс стальных и легкосплавных дисков. Можно с достаточной определенностью провести границу между теми и другими дисками. Весь грузовой транспорт, а также троллейбусы, автобусы, автолайны, там, где нагрузка на одно колесо составляет до 10 кН и более и велик риск усталостного или случайного разрушения, базируются исключительно на стальных дисках. Однако, если учесть, что даже в авиации благодаря высокому качеству литых дисков, изготавливаемых, к примеру, в институте легких сплавов (ВИЛС, г. Москва, Сетунь), происходит решительная смена стальных колес на легкосплавные, можно предположить о зыбкости и неустойчивости названной границы существующего баланса. Успешное продвижение легкосплавных дисков в автомобильную промышленность связано и со скрытыми, часто недостаточно осознаваемыми причинами. Одна из них – дань моде, которая часто побеждает здравый смысл и чисто экономические показатели. Но есть и более

серьезная причина – это отсутствие строгих стандартов на шум, вибрации, отсутствие течи масел из подвесок, трансмиссии, подшипниковых узлов и т.д., работа которых непосредственно связана с точностью динамической балансировки колес.

Нетрудно представить, что основные тенденции совершенствования и развития автомобилей будут проходить непосредственно в направлении дальнейшего снижения так называемых неподрессоренных масс. Здесь важно отметить новые предпосылки дальнейшего прогресса, связанные с увеличением диаметра колес за счет увеличения диаметра диска с одновременным снижением профиля шины. Это необъятное поле деятельности, однако, все более четко вырисовывается технологический аспект проблемы: какая технология – традиционная или новая, развивающаяся способна обеспечить устойчивое планомерное повышение качества.

Существенным недостатком традиционной технологии производства стальных штампованных дисков является наличие операции сварки. Сварка привносит не только ослабление металла в околошовной зоне, но и значительные термические поводки как в радиальном, так и в осевом направлениях. Кроме того, сварка накладывает ограничения на химсостав стали – содержание углерода, легирующих элементов, вредных примесей. По условиям обеспечения свариваемости сталь должна быть низкоуглеродистой. Высокая пластичность такой стали, способность к восстановлению формы после удара широко используется в автомобильных дисках. На отношение σ_T/σ_b (предела текучести к пределу прочности), а также σ_{02}/σ_T (предела пропорциональности к пределу текучести) таково, что даже при незначительных ударах происходит отгиб бурта. Последующая правка не может восстановить первоначальную точность; применение бескамерных шин становится невозможным, динамическая балансировка нарушается. Отгибу и короблению бурта в немалой степени способствует сравнительно небольшая толщина листа, из которого накатывается диск. А так как, например, у алюминиевых сплавов плотность в 3 раза меньше, то у поставщика алюминиевых дисков есть значительный простор для увеличения толщины и обода, и спиц, и ступицы. Поэтому при прочих сопоставимых условиях вероятность изгиба утолщенной стенки уменьшается, что и подтверждается практическими данными [117–118].

Но, строго говоря, и у легкосплавных дисков есть свои внутренние проблемы. Для получения высокоточных дисков нужна массивная грубая заготовка, из которой на станках с ЧПУ можно поднять на достаточно высокий

уровень точность размеров, повысить равномерность распределения масс, обеспечить высокое качество поверхности. Именно по этому пути идут поставщики штампованных алюминиевых дисков, которые не считаются ни с большим отходом металла в стружку, ни с трудоемкостью, ни с затратами, связанными с использованием высокоэнергоемких и дорогих гидравлических прессов. Стоимость дисков достигает 100...150 \$. Рынок такими дисками насыщен, равно как и литыми дисками из литейных алюминиевых сплавов, стоимость которых в пределах 30...50 \$.

Акцентируя внимание на технологическом аспекте проблемы, важно особо подчеркнуть, что сегодня автомобильные диски представляют образец металлопродукции, на примере которой происходит замена стали на сплавы на основе алюминия. Это принципиальный факт, указывающий на далеко идущие последствия как с экономической точки зрения, так и с позиций рационального природопользования.

В настоящее время, как уже отмечалось выше, оборудование и технологии сталеплавильного производства изрядно устарели и не отвечают возросшим требованиям по качеству и экологичности [111]. К тому же производство стали связано со значительным истреблением невозобновляемых нефтяных, угольных и газовых ресурсов, с истощением ископаемых запасов руды, использованием ферросплавов, флюсов, раскислителей, модификаторов, в то время как возможность повторного и тем более многократного использования вторичных металлов (стального лома) технологически не проработана.

Преимущество алюминиевых дисков проявляется в том, что в результате переплава свойства сплава можно восстановить, регенерировать. Тогда в противовес традиционной концепции массового, крупносерийного производства стальных сварноштампованных дисков может быть предложена концепция гибкого, переналаживаемого металлургического мини-производства, основанная на повторном использовании дисков, снятых с эксплуатации.

Таким образом, усматривая в технологии производства легкосплавных дисков определенные перспективы их удешевления и повышения точности, следует сосредоточиться преимущественно на литейной технологии, потенциальные возможности которой используются исключительно по отношению к литейным сплавам алюминия, в то время как разработаны специальные термически упрочняемые сплавы, но опыт их использования для

изготовления отливок ограничивается освоением лишь такого специфического процесса, как жидкая штамповка [28 – 30].

Процесс жидкой штамповки выступает как компромисс, сочетающий в себе, с одной стороны, преимущества литья (не требуется уникальное оборудование), с другой стороны, поскольку используются алюминиевые сплавы, упрочняемые термической обработкой до $\sigma_b = 450... 500$ МПа (у обычных литых 150...200 МПа) при относительном удлинении 4... 6 %, как при производстве штампованных алюминиевых дисков, появляется возможность снизить массу и повысить точность балансировки.

Однако жидкая штамповка имеет свои недостатки:

- в течение времени от момента окончания заливки до наложения давления в тонких сечениях металл успевает закристаллизоваться до наложения давления;

- после образования корочки закристаллизовавшегося металла по поверхности штампа передать давление на внутренние незакристаллизовавшиеся объемы не представляется возможным;

- ввиду большой площади проекции на плоскость разъема штампа для получения качественных отливок требуется пресс усилием около 20 МН (2000 тс); это на порядок меньше, чем при объемной штамповке, но в 400 раз больше, чем при литье под низким давлением.

Тем не менее, с разработкой нового процесса литья автомобильных дисков из алюминиевых высокопрочных сплавов можно связать решение вопросов и качества, и стоимости колесных дисков.

Существенная новизна предполагаемого процесса состоит в том, что прессующий плунжер, преодолевая сопротивление твердой корки, давит на жидкий металл методически по заранее отработанной программе по параболическому, экспоненциальному или другому закону с учетом конкретных особенностей сплава и самой отливки. Под влиянием давления изнутри, а его величина может достигать 300...500 МПа и более, достигается высокая степень пропитки микроскопических междендритных пространств, но что особенно важно подчеркнуть, отливка как сосуд, нагруженный внутренним давлением, плотно прижимается к поверхности пресс-формы, воспроизводя с высокой точностью геометрические размеры ее полости [119].

Но перенос опыта, приобретенного на сравнительно простых деталях [90], на такие изделия, как колесные диски невозможен по целому ряду причин, основные из которых: достаточно крупные размеры, наличие тон-

ких сечений на значительном удалении от места подвода и подпрессовки металла. Но так как и при производстве литых дисков из силумина, когда недостаток прочности восполняется увеличением толщины стенки, при освоении нового процесса можно пойти на компромиссное решение – упростить конфигурацию, увеличить массу, а необходимую точность и существенное снижение массы получить в процессе окончательной механической обработки.

Воспользуемся следующим методом предварительной оценки того положения, которое занимает разрабатываемый процесс, назовем его литьем с кристаллизацией под давлением (ЛКД), по отношению к вышеупомянутым процессам штамповки дисков из стали (ШС), литья под низким давлением (ЛНД) и штамповки из высокопрочных алюминиевых сплавов (ША). В качестве критерия K оценки примем безразмерное отношение качества продукции Q к рыночной стоимости $\$$. Т.е. $K = \frac{Q}{\$}$, причем конкурентоспособность, очевидно, будет тем выше, чем выше сумма баллов, характеризующих качество, и чем ниже сумма баллов, связанных с формированием стоимости.

Для оценки качества предполагаются основные показатели – динамичность W , дизайн D , прочность σ , пластичность δ , коррозионная стойкость R . Таким образом,

$$Q = a_1W + a_2D + a_3\sigma + a_4\delta + a_5R, \quad (44)$$

где a_1, a_2, \dots – весовые коэффициенты при соответствующих показателях. С учетом того, что наиболее приоритетными показателями являются динамичность и дизайн, приняты следующие значения показателей: $W = 3$; $D = 2$; $\sigma = 1,5$; $\delta = 1$; $R = 0,75$.

Стоимостными показателями при этом являются затраты на исходные материалы M , технологические издержки T , на заработную плату Z , амортизацию оборудования V , налоги N и прибыль U .

Как и в предыдущем случае просуммируем баллы по показателям с учетом соответствующих весовых коэффициентов:

$$\$ = b_1M + b_2T + b_3Z + b_4V + b_5N + b_6U. \quad (45)$$

Принято, что $M = 2$; $T = 1,5$; $Z = 1$; $V = 2$; $N = 2$; $U = 1$.

По поводу значений показателей необходимо сказать, что здесь приведены их ориентировочные значения. Безусловно, при каждом определенном расчете эти значения могут быть скорректированы.

Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнительный анализ процессов производства
автомобильных дисков

Весовые коэффициенты	ШС	ЛНД	ША	ЛКД
a_1W	0,5·3	0,7·3	1·3	0,8·3
$a_2Д$	0,5·2	1·2	0,8·2	0,9·2
$a_3\sigma$	1·1,5	0,5·1,5	1·1,5	0,8·1,5
$a_4\delta$	1·1	0,5·1	1·1	0,8·1
a_5R	0,5·0,75	0,8·0,75	0,9·0,75	0,9·0,75
Q	5,37	5,97	7,775	7,075
b_1M	0,3·2	0,4·2	1·2	0,2·2
b_2T	0,2·1,5	0,21·5	1·1,5	0,2·1,5
b_3Z	0,1·1	0,3·1	1·1	0,3·1
b_4V	0,1·2	0,1·2	1·2	0,3·2
b_5N	0,2·2	0,3·2	1·2	0,2·2
b_6U	0,1·1	0,2·1	1·1	0,4·1
$\$$	1,7	2,4	9,5	2,4
K	3,15	2,48	0,82	2,94

Ниже приведены комментарии к выбору тех или иных значений весовых коэффициентов.

При определении всех весовых коэффициентов, кроме a_2 и a_5 для процесса ША значения приняты равными 1. Это понятно потому, что другие процессы составляют некоторую часть как по качеству, так и по затратам. Значение $a_2 = 1$ приписано литым колесам, где возможности варьирования дизайном самые высокие. Значение $a_5 = 0,9$ самое высокое у ША и ЛКД. Значения a_1, a_3, a_4 у ЛКД с учетом отсутствия серийной технологии взяты заниженными, а $b_1 - b_6$ несколько завышенными по сравнению с их фактическими значениями, полученными при изготовлении опытных отливок.

Наглядное представление о формировании стоимости автомобильных дисков в зависимости от базового технологического процесса с учетом вышеперечисленных видов затрат дает рис. 40.

Стоимость ЛКД-дисков может быть ограничена до 50 \$ (на 10 \$ дороже литых из силумина) при максимальном приближении к ША-дискам как по динамичности, так и по механическим свойствам, при этом критерий $K=2,94$ примерно такой же, как у ШС и ЛНД-дисков, но значительно более высокий, чем у ША-дисков.

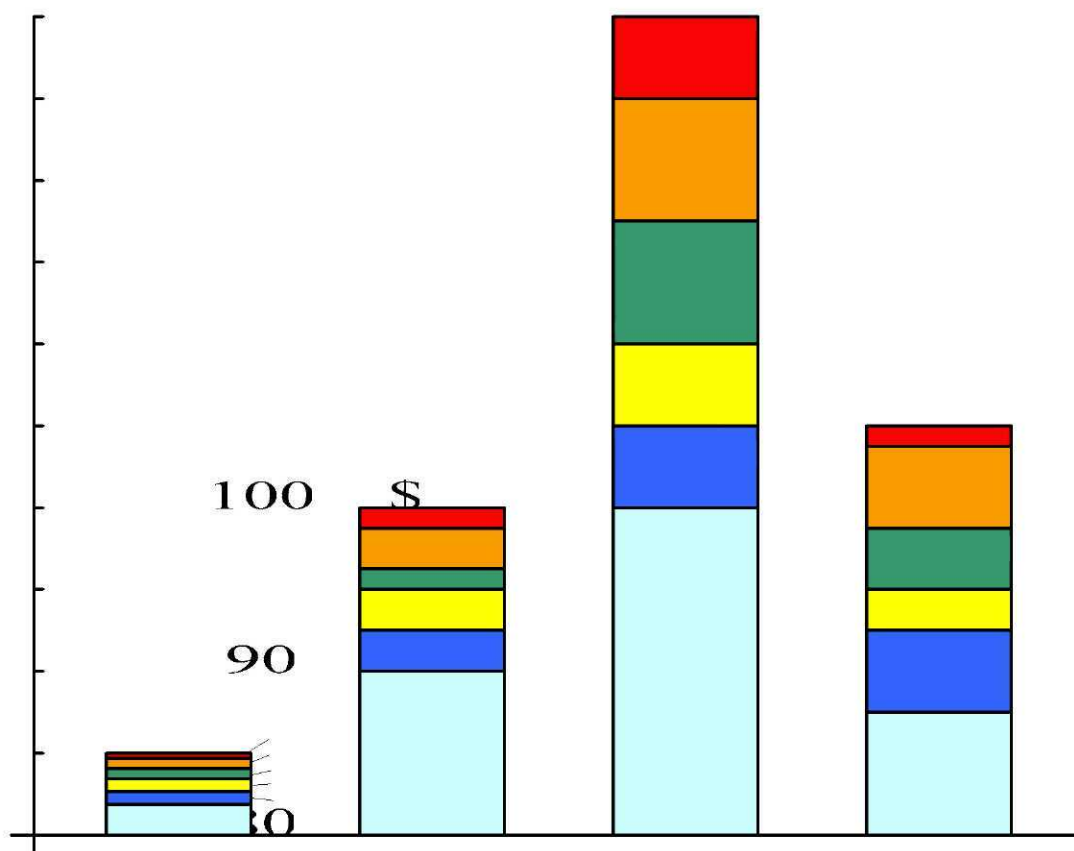


Рис. 40. Формирование стоимости автомобильных дисков в зависимости от базового технологического процесса
 Обозначения: ШС – штамповка из стали; ЛНД – литье под низким давлением из алюминиевых литейных сплавов; ША – штамповка из высокопрочных алюминиевых сплавов; ЛКД – литье с кристаллизацией под давлением

Преимущества ЛКД-дисков, как видно из рис. 40, основываются на существенном снижении затрат на исходные материалы. При соответствующей организации производства в качестве шихты можно использовать вторичный металл от переплава колес, прошедших полный жизненный цикл и снятых с эксплуатации. В этом случае стоимость ЛКД-дисков можно сни-

зять еще на 5...10 \$. За счет автоматизации и использования сравнительно недорогого оборудования можно снизить и затраты, заложенные на технологию, зарплату, амортизацию оборудования.

Таким образом, выполненная предварительная оценка состояния рынка автомобильных дисков позволяет сделать следующие выводы и рекомендации:

1) на современном этапе развития легкового автомобильного транспорта повышенные требования к точности и динамической балансировке наряду с современным дизайном и прогрессивным снижением общей массы колес могут быть обеспечены при условии использования деформируемых термически упрочняемых алюминиевых сплавов;

2) освоенный в промышленности процесс производства штампованных дисков из высокопрочных алюминиевых сплавов обеспечивает изготовление безупречных по качеству дисков, которые, однако, по стоимости являются недоступными для широкого круга автолюбителей;

3) дальнейшее повышение безопасности движения во многом зависит от предоставления всем участникам движения наивысших достижений и разработок по автомобильным дискам, но для этого их стоимость необходимо довести до 40...50 \$; важно, чтобы каждый автомобиль был оснащен двумя комплектами колес и их общая стоимость не превышала 500 \$;

4) альтернативой штампованным могут быть литые диски из тех же высокопрочных сплавов, кристаллизация которых происходит под высоким, примерно 300...500 МПа, давлением;

5) с технологической точки зрения автомобильные диски представляют собой сложные пространственные конструкции с большой поверхностью контакта жидкого металла с металлической формой; четкое формообразование, удаление газов и формирование плотной равномерной структуры связано с отработкой режимных параметров и их четким выполнением;

6) важнейшим на пути создания новой технологии и оборудования для производства ЛКД-дисков является этап экспериментальных исследований и технологических изысканий.

4.2. Анализ результатов исследований

На целом ряде отливок из различных сплавов, включая и высокоточные деформируемые алюминиевые сплавы, установлено, что, если на кристаллизующийся металл методически по определенной программе накладывать

давление, обеспечивающее четкое воспроизведение конфигурации литейной формы, компенсацию всех видов усадки и формирование однородной структуры, то полученные при этом заготовки по свойствам приближаются к кованным и штампованным заготовкам, но превосходят их по технико-экономическим показателям [79]. При этом принципиальное значение приобретают режимные параметры процесса. Как правило, возможность эффективного наложения давления зависит от соотношения интенсивности теплообмена и скорости наложения давления. Отливки, у которых приведенный размер, т.е. отношение объема к поверхности контакта с формой, близко к приведенному размеру шара, при прочих сопоставимых условиях позволяют добиться высоких результатов. С этой точки зрения автомобильный диск представляет собой геометрическое тело, которое может быть сформировано в результате течения металла по поверхности формы на значительном расстоянии (200...300 мм) и заполнения пространств с толщиной стенки 5...8 мм, в которых создать давление на кристаллизующийся металл можно, но это требует тщательной отработки соответствующих приемов, соблюдения определенной последовательности операций, контроля, регулирования и управления параметрами технологического процесса.

Обоснование принципиальной схемы процесса

Выше отмечалось, что низкую жидкотекучесть и высокую вязкость высокопрочных сплавов типа Д1, Д16, В95 при заполнении формы можно компенсировать опрессовкой жидкого металла в замкнутой полости формы за счет сближения подвижных формообразующих вкладышей или с помощью прессующего плунжера под сравнительно низким давлением, примерно 5...10 МПа.

Схема заполнения полости формы жидким металлом, принятая при литье автомобильных дисков литьем под низким давлением с противо-давлением, не может быть адаптирована к литью с кристаллизацией под давлением ввиду несовместимости достаточно мощного гидравлического пресса с печью и металлопроводом при сравнительно высокой температуре металла (примерно 750 °С и выше).

Неприемлема и схема заполнения с использованием камеры прессования как при литье под давлением ввиду большой массы металла и разрастания габаритов пресса и оснастки из-за значительной величины хода плунжера (примерно 600...800 мм).

Наиболее простая и легко реализуемая гравитационная заливка слишком продолжительна во времени и не обеспечивает поддержание металла в жидком состоянии до окончания заполнения полости формы и наложения давления.

Для заготовки автомобильного диска, 3D-модель которого представлена на рис. 41, характерно традиционное исполнение обода в соответствии с рекомендациями [118], что же касается лицевой части, то без претензий на оригинальность, она ближе всего к такому аналогу, как «Премьера» [118], отличается наличием восьми предельно тонких спиц, создающих максимальный просвет, необходимый для обдува тормозных суппортов. Обращает на себя внимание и изогнутая форма спиц с плавным переходом в обод. И хотя данная конструкция весьма скромная по дизайну, она в большей степени по сравнению с другими функциональна с технологической точки зрения. Дело в том, что при подводе металла изнутри по центру спицы могут выполнять роль элементов литниковой системы. Сложную конфигурацию диска можно расчленить на симметричные элементы, число которых равно числу спиц. При центральном подводе металла существенно упрощается наложение высокого давления, а так как обод достаточно удаленная и тонкостенная периферия, то спицы своей формой и размерами призваны обеспечить принцип направленной кристаллизации – от периферии к центру.



Рис. 41. Конструктивное исполнение опытной литой заготовки

Названный принцип исключительно важен в реализации идеи наложения давления на кристаллизующийся металл на всех этапах формирования отливки в различных ее зонах. Однако, если не принять специальных мер, при использовании горизонтальной камеры прессования вследствие влияния сил гравитации течение металла по спицам, ориентированным вниз, и по таким же спицам, направленным вверх, будет иметь различный характер. Выход напрашивается сам собой – применить вертикальную камеру прессования. В этом случае камера прессования для обеспечения заливки металла должна оставаться открытой (прессующий плунжер должен быть

отведен на значительное расстояние вверх) либо быть оснащенной дополнительными устройствами для подачи металла в камеру прессования, в которой прессующий плунжер максимально приближен к зеркалу металла, на который накладывается давление. Другими словами, вертикальная компоновка – это возврат к жидкой штамповке с большим интервалом времени между окончанием заливки и наложением давления, что совершенно неприемлемо для автомобильного диска, если стремиться заготовку максимально приблизить к готовому изделию.

Особого внимания заслуживает вопрос, связанный с обеспечением высокой геометрической точности заготовки, от которой в последующем зависят объем механической обработки, статическая и динамическая балансировка.

В большей или меньшей степени обозначенным требованиям на основе предварительного изучения и анализа отвечает процесс, представленный на рис. 42.

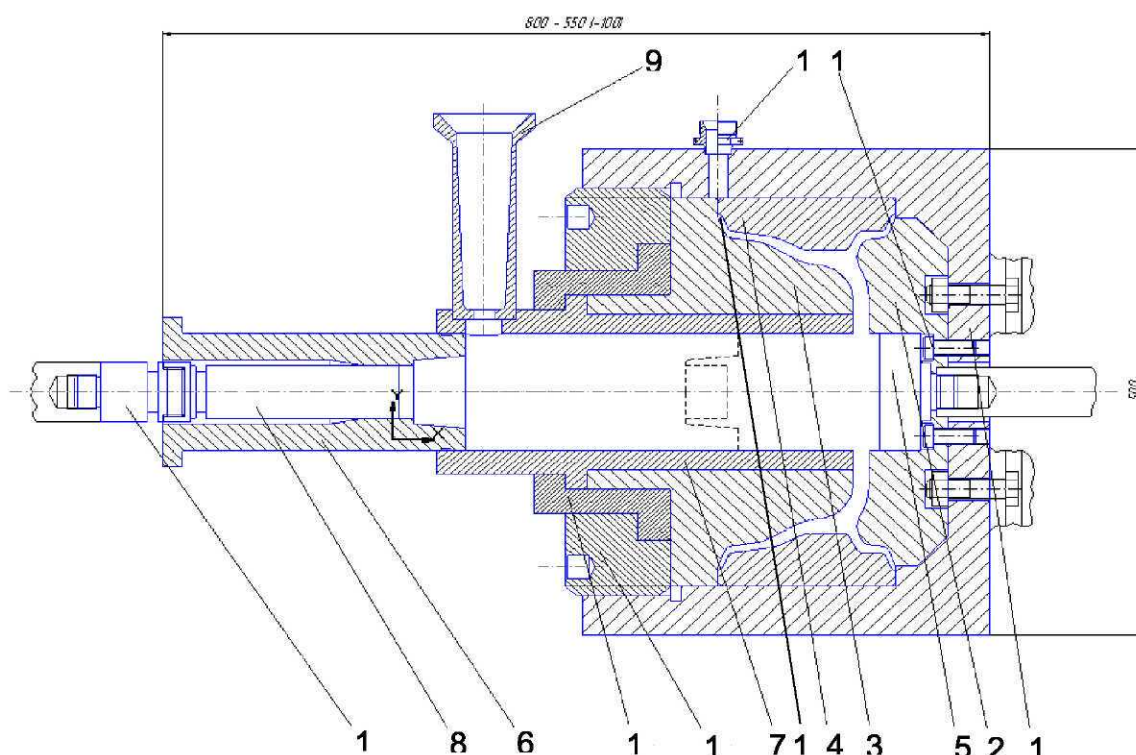


Рис. 42. Принципиальная схема процесса

Предполагается, что в пространство горизонтального пресса размерами $800 \leftrightarrow 550 \times 500 \times 500$ мм на неподвижную плиту строго соосно монтируется жесткая матрица 1. Специально предусмотренные посадочные по-

верхности обеспечивают точный монтаж формообразующих вкладышей – правого 2, левого 3 и разъемного стржня 4. Контрплунжер 5, прессующий плунжер 6, камера прессования 7 и мультиплицирующий плунжер 8 образуют систему заливки и наложения давления на металл, соосную с системой формообразования, представленной деталями 2, 3, 4 в матрице 1. В исходном состоянии контрплунжер 5 может занимать положение, показанное на схеме, или перекрывать камеру прессования 7 на время заполнения металлом.

Заполнение камеры прессования жидким металлом обычно осуществляется из чайникового ковша через заливочную чашу 9, высота, диаметр и проходное отверстие которой выбираются конструктивно с учетом удобства и скорости заливки. Прессующий плунжер 6 в начале своего движения перекрывает заливочное отверстие, затем разгоняет металл до скорости, при которой металл встречает гидравлическое сопротивление в спицах, пролетает в отдельные зоны обода и, отражаясь от стенок, постепенно заполняет «свой» сектор. На схеме приведено положение прессующего плунжера, соответствующее моменту окончания заполнения и наложения давления, обеспечивающего четкое формообразование заготовки.

После этого с помощью мультиплицирующего плунжера 8 в объеме пресс-остатка по программе, согласованной со скоростью кристаллизации от периферии к центру, давление накладывается на незакристаллизовавшийся металл. Это давление по внутренним каналам передается в спицы, а далее в более тонкие сечения обода и ребер. Это внутреннее давление, достигающее 300...500 МПа и более, оказывает специфическое влияние на кристаллизующийся металл, которое сводится к компенсации усадки, формированию однородной структуры, вязко-пластическому течению и другим эффектам.

Обеспечение геометрической точности заготовки

Соосность формообразующих вкладышей оснастки создает предпосылки для формирования конфигурации заготовки диска относительно поверхности вкладыша 2, который можно рассматривать как технологическую базу. Выступы вкладыша 2 формируют пространства между спицами. Возможные поводки и деформации могут быть устранены механической обработкой двух поверхностей точения – по левой торцевой поверхности и по желобу обода. В качестве сменной технологической базы может быть использована левая торцевая поверхность. Это позволит вести обработ-

ку лицевой поверхности диска со снятием припуска 0,3...0,5 мм в режиме алмазного точения с сохранением равномерного распределения масс во всем объеме диска как в радиальном, так и в осевом направлениях. При определенной доработке процесса пресс-остаток, в котором металл в наибольшей степени пропрессован, может быть преобразован в ступицу, органически и без биения связанную с диском.

Таким образом, принятый для исследования и разработки процесс, с одной стороны, нацелен на максимальное использование давления для улучшения физико-механических свойств, снижения массы, повышения точности и не имеет аналогов ни в отечественной, ни в мировой практике, с другой стороны, сопряжен с целым рядом проблем как теоретического, так и чисто технологического характера. Для реализации предложенного процесса необходимо спроектировать и изготовить технологическую оснастку, выбрать соответствующее оборудование, выполнить экспериментальные и теоретические исследования.

Проектирование технологической оснастки и выбор оборудования

Такие этапы разработки процесса, как обоснование принципиальной схемы, проектирование оснастки и выбор оборудования требуют принятия согласованных системных решений. При отработке процесса, в частности, серийно выпускаемое оборудование не может быть использовано ввиду того, что его технологические возможности не позволяют накладывать давление по предложенной схеме. Поэтому уже на этапе отработки был использован пресс оригинальной конструкции ПЛД-300 (рис. 43), подробное описание которого приводится в работе [79]. При этом не исключено, что этот пресс окажется непригодным для отливок данного типоразмера, но в результате исследований предоставится возможность с большей определенностью разработать техническое задание на модернизацию существующего или на создание нового прессы для производства автомобильных дисков.

Выше отмечалось, что при наличии жестко зафиксированных формообразующих вкладышей 2, 3, 4 и подвижных плунжеров 5, 6, 8 можно отрабатывать различные приемы заполнения полости формы – от свободной гравитационной заливки до впрыска под высоким давлением. Но как показали самые первые попытки наложения давления на столь сложную по конфигурации и размерам отливку, технологическая оснастка должна быть приведена в соответствие с возможностями оборудования и содержать

специальные элементы для удержания давления в достаточно широких температурных и временных интервалах.

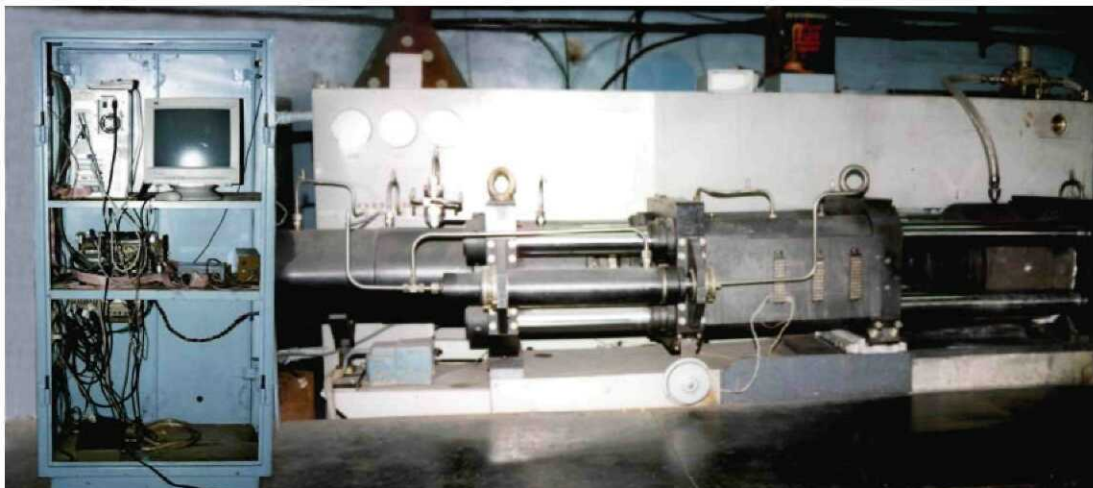


Рис. 43. Специальный гидравлический пресс ПЛД-390 с компьютерной системой управления

Для обеспечения гравитационного заполнения пресс-формы и камеры прессования матрица 1 выполнена в виде жесткого контейнера, перекрываемого резьбовым затвором 10; последний во взаимодействии с захватом 12 обеспечивает также полное размерное и силовое замыкание систем заливки, формообразования и опрессовки кристаллизующегося металла.

Кроме того, для управления газовым режимом формы на стадии заполнения жидким металлом предусмотрена автономная вакуумная система, представляющая собой вакуумный насос, вакуумный ресивер, гибкий шланг, штуцер 12, а также щелевидные каналы по плоскости разъема стержня 4.

Наглядное представление о форме, размерах, сборке и взаимодействии деталей технологической оснастки дает 3D-модель, приведенная на рис. 44. Конструкция, размеры, применяемые материалы, твердость, особые технические требования к деталям технологической оснастки приведены в прил. 1.

Вместе с тем из рис. 42 и 44 видно, что после технологической выдержки и охлаждения отливки до требуемой температуры сначала мультиплицирующий плунжер 8, затем прессующий плунжер 6 отводятся в исходное положение. С помощью приспособления вывинчивается затвор 10, в процессе выдвижения контрплунжера 5 отливка вместе с вкладышем 3 и с

разъемным стрежнем 4, оформляющим внешнюю поверхность обода, выпрессовывается из контейнера 1, после чего весь пакет с помощью подъемника вынимается из рабочего пространства пресса и на столе с использованием технологических приспособлений осуществляются разъем и извлечение стрежня, выталкивание пресс-остатка, отрыв отливки от вкладыша 3.

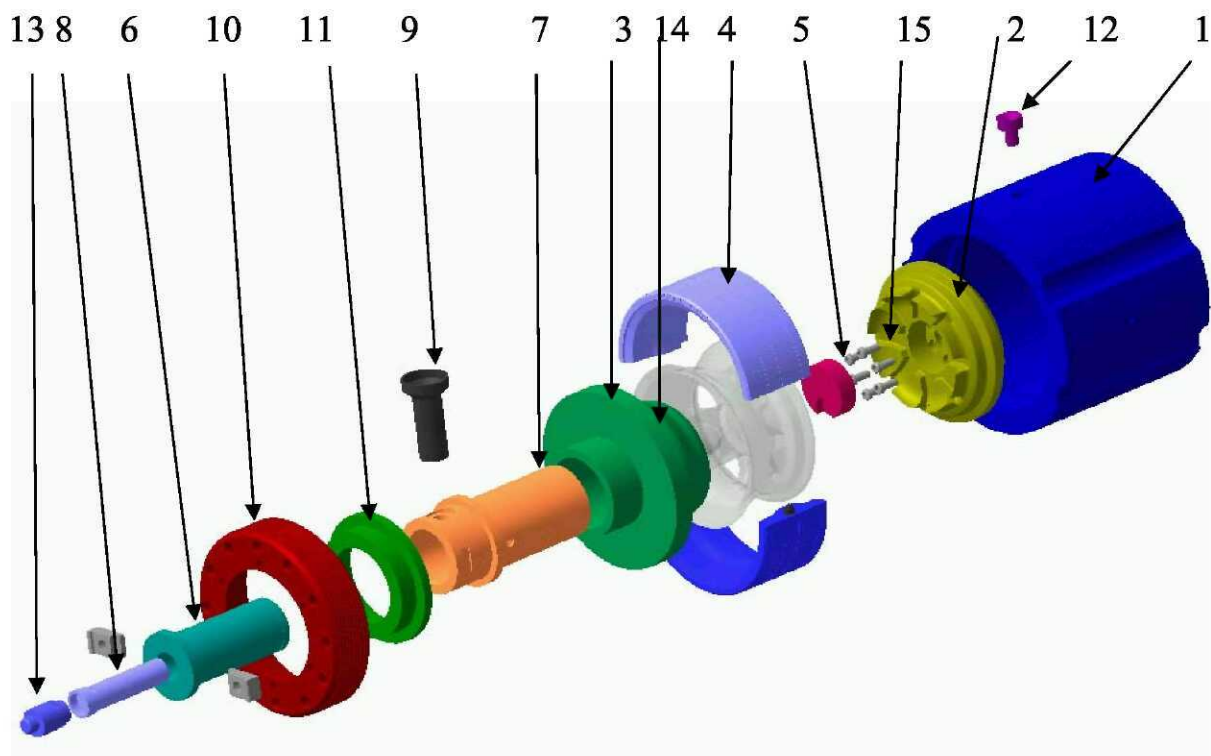


Рис. 44. 3D-модель элементов технологической оснастки

Сборка и разборка оснастки представляют собой достаточно сложные и трудоемкие операции, которые на данном этапе исследований не в полной мере механизированы и автоматизированы. Этот недостаток существенно ограничивает масштабы выполняемых экспериментов, но положительная сторона заключается в стремлении использовать наиболее компактное, мобильное, малоэнергоёмкое оснащение в отработке технических решений в предположении о том, что после получения годных отливок в конструкцию этого оснащения можно внести окончательные изменения и доработки, обеспечивающие снижение трудозатрат и повышение производительности.

Уместно отметить, что в качестве приводов плунжеров 5 и 8 использованы компактные гидроцилиндры, развивающие усилие 0,3 МН (30 тс), а усилие 3 МН (300 тс), накладываемое на плунжер 6, развивает гидроцилиндр с мультипликатором, при этом ход подвижной плиты пресса 250 мм, а максимальные размеры гидроцилиндра $\varnothing 400 \times 800$ мм. Габаритные размеры пресса (ширина \times высота \times длина) 500 \times 1500 \times 6300 мм, мощность, потребляемая гидронасосами, 15 кВт. Спроектированная оснастка позволяет создать в контейнере давление на кристаллизующийся металл до 250 МПа, при котором усилие, воспринимаемое затвором 10, достигает 18 МН (1800 тс).

Очевидно, что использование резьбового затвора, несмотря на отмеченные выше недостатки, позволило создать закрытую жесткую статическую систему, не требующую применения таких сложных устройств, как механизмы запираания, аккумуляторы, громоздкие основания, плиты и колонны.

Анализ результатов экспериментальных исследований

Исследования проводились на сплаве В95, химический состав которого приведен в табл. 4.

Таблица 4

Химический состав сплава В95

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

В качестве шихты использовано вторичное сырье – обрезки труб из указанного сплава. Выплавку металла осуществляли в электрической печи сопротивления в графитовых тиглях под слоем флюсов, представляющих собой химические соединения щелочноземельных металлов с галогенами. Нагрев технологической оснастки осуществляли с помощью газовой горелки.

После заливки металла в камеру прессования управление работой прес-са осуществляется в автоматическом режиме с использованием специально разработанной компьютерной системы с соответствующим программным обеспечением и графическим интерфейсом (рис. 45).

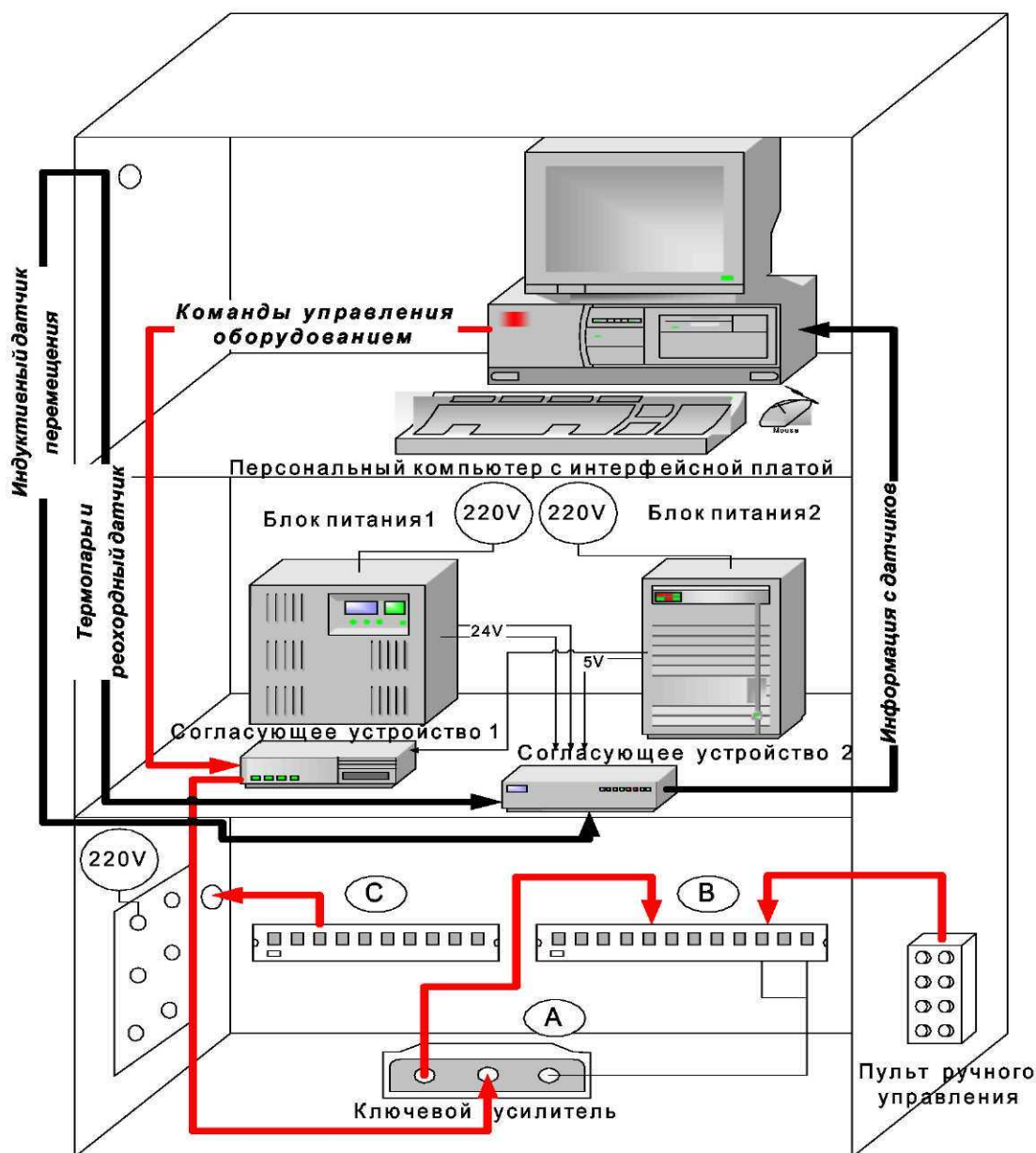


Рис. 45. Внешний вид и компоновка системы управления

В каждом эксперименте осуществлялась запись изменения таких параметров, как давление рабочей жидкости в гидросистеме, перемещения плунжеров 5, 6, 8 и мультипликатора. Ниже приведены краткие комментарии к выполненным экспериментам.

Эксперимент 1.

Цель: отработка режимов заполнения формы и наложения давления.

Отрабатывался вариант заполнения формы под высоким давлением. Как видно на циклограмме (рис. 46) во время движения прессующего плунжера 6 (см. рис. 42) контрплунжер 5 был включен (движение навстречу) на перекрытие камеры прессования 7, но под влиянием давления металла был отжат на расстояние 4...5 мм, так что дальнейшее заполнение формы происходило через щелевидные каналы, ширина которых, как видно на циклограмме, изменяется рывками в пределах 2...5 мм, а в конце хода плунжера 6 контрплунжер 5 смещен от исходного положения на 7...8 мм. Это произошло потому что мультипликатор к этому времени проделал значительный путь и, вероятно, в рабочей полости гидроцилиндра, развивающего усилие на плунжер 6, создал более высокое давление по сравнению с рабочим давлением в гидросистеме.

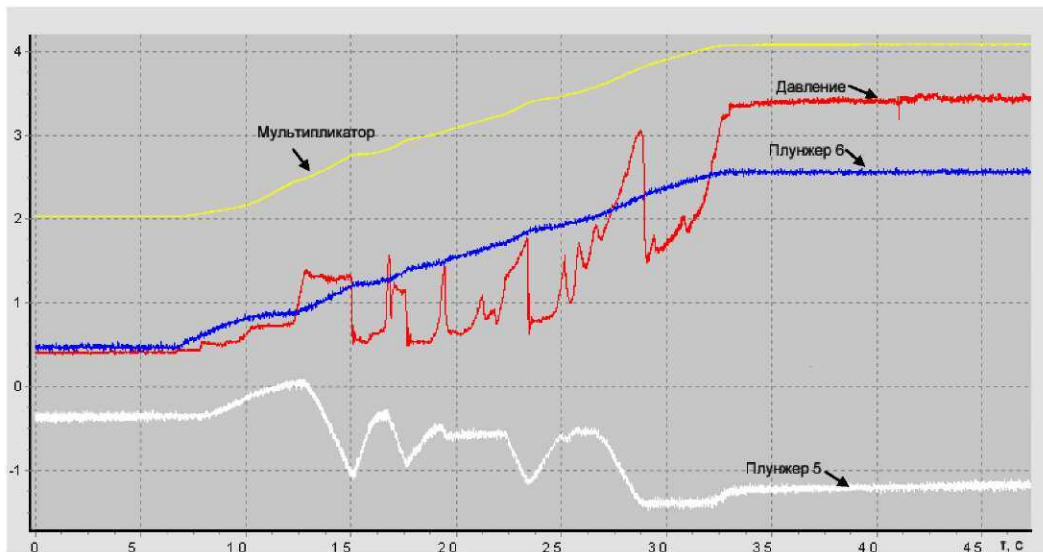


Рис. 46. Технологическая циклограмма процесса

Этот факт, зафиксированный с помощью соответствующих датчиков и преобразователей, наводит на мысль, что именно управление движением мультипликатора можно использовать для того, чтобы в определенных пределах изменять гидродинамические режимы заполнения полости формы. Для этого необходимо в систему информационного обеспечения ввести датчики усилий непосредственно на плунжерах 5 и 6. Задавая и регулируя разность давления, можно не только стабилизировать ширину щели и скорость движения металла в полость формы, но и изменять эту ширину и

скорость на разных этапах оформления различных участков объема отливки. Однако создание такой системы – это достаточно сложная и самостоятельная задача, которая не может быть решена в данной работе ввиду отсутствия и датчиков, и пресса с управляемым гидроприводом мультипликатора.

В 1-м эксперименте, как видно из табл. 5, 6, 7, несмотря на полную реализацию управляющей программы, положительный результат не был достигнут. Отливка оформлена не полностью, есть газовые раковины, трещины, неспай. Но главный недостаток – это отсутствие пропрессовки металла по ободу, выявляемое визуальным осмотром. В отличие от обычного гравитационного литья, у которого поверхность светлая и рыхлая, при литье с кристаллизацией под давлением качественно пропрессованный металл имеет глянцевую черную (от взаимодействия со смазкой) поверхность. Как и при литье под давлением отсутствие пропрессовки обнаруживается по появлению на участках поверхности блесков кристаллов («мороз»), что можно рассматривать как следствие втягивания ликвата внутрь отливки при отсутствии давления изнутри.

Таблица 5

Параметры опытных отливок

Эксперимент	Длина основной части пресс-остатка H , мм	Глубина прохода плунжера	Толщина кольца	Масса отливки по моделям	Масса пресс-остатка по моделям
		h , мм	S , мм	$m_{отл}$, кг	$M_{пр.ост}$, кг
1	100	0	0	10,2	3,6
2	109	14	0	10,19	3,97548
3	172	24	10	12,477	6,26248
4	108	51	10	10,231	4,01648
5	109	33	10	10,385	4,17048
6	109	47	10	10,2905	1,07598
7	109	100	10	10,04	3,825
8	109	110	10	10,30	4,012
Замеренные значения					
Плотность металла ρ , г/см ³		2,85			
Масса отливки, кг		6,21452			

Параметры технологического процесса

Эксперимент	Температура печи	Температуры пресс-формы при заливке	Шихта	Время движения плиты (заполнения)	Объем пропрессованного металла по ободу по отношению ко всему ободу
	$T_{\text{печи}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{формы}}, ^\circ\text{C}$		τ, c	$V_{\text{пр}}, \%$
1	800	150	Лом 100 % (B95)	26	~ 5
2	»	180...200	Лом 50 % возврат 50 %	10	5
3	810	» »	» »	6	15
4	820	» »	» »	7	45
5	»	» »	» »	6,5	35
6	»	» »	» »	6	45
7	850	» »	» »	13	10
8	800	150...160	» »	9	22

Причина брака также состоит в том, что плунжер 8, обеспечивающий наложение давления на кристаллизующийся металл изнутри (из-под корки), не включался в работу, процесс осуществлялся по схеме жидкой штамповки, максимальное усилие на металл составило 0,6 МН (60 тс) и развиваемого давления 53 МПа оказалось явно недостаточно для пропрессовки металла во всем объеме. Использовать максимальное усилие 3 МН, развиваемое мультипликатором, оказалось невозможным ввиду уже отмеченного несовершенства системы управления.

Главной причиной брака отливки является медленное движение плиты и как следствие неоправданно длительное заполнение формы металлом (примерно 26 с). И хотя рассмотренный вариант заполнения с перекрытием камеры прессования представляет несомненный интерес с точки зрения разгона металла, одновременное включение трех гидроцилиндров при достаточно ограниченных ресурсах гидросистемы пресса нашло свое выражение в захолаживании металла во время заполнения формы. Отсюда можно сделать, хотя и предварительно, вывод о необходимости реконструкции узла мультипликатора, и улучшения динамических характеристик гидропривода.

Наличие дефектов в опытных отливках

Эксперимент	Неспай	Трещины	Поверхностные газовые раковины
1	Присутствуют	Обнаружены по ободу	В нижней части
2	Ярко выраженные	Небольшие толщиной 0,5...1 мм внизу, продольные (3 шт.) и поперечные (3 шт.)	На нижней внутренней поверхности обода
3	Практически отсутствуют в связи с большим количеством заливаемого металла, быстрым заполнением формы	Вдоль по ободу 1...2 мм шириной, продольные (3 шт.), поперечные (4 шт.)	На нижней внутренней и верхней поверхностях обода
4	Меньше, чем во втором эксперименте	Ширина 1...1,5 мм, продольные (2 шт.), поперечные (3 шт.)	На нижней внутренней и верхней поверхностях обода
5	Видны отдельные	Значительные до 3 мм	На нижней внутренней и верхней поверхностях обода
6	Присутствуют	Ширина 0,5...1 мм	На нижней внутренней и верхней поверхностях обода менее выраженные
7	Отсутствуют	Ширина 1...1,5 мм	На нижней внутренней и верхней поверхностях обода менее выраженные
8	Отсутствуют	Незначительных размеров	Отдельные раковины

Эксперимент 2

Необходимо отметить, что перед заливкой металла технологическую оснастку прогревали электрическими тэнами до 150... 180 °С или газовой горелкой до 200...250 °С. Рабочую поверхность формы покрывали с помощью распылителя раствором коллоидно-графитной краски SN2000. Во избежание образования задиров подвижные детали обрабатывали специальной графитовой смазкой. Подготовительные операции перед выполнением экспериментов фиксировались в Карте параметров технологического процесса, составленной в соответствии с ГОСТ 3.1118–82 (табл. 8).

Условия реализации эксперимента наглядно представлены на циклограмме (рис. 47), из которой видно, что во время заполнения камеры прессования металлом плунжер 5 сначала перекрыл отверстие, затем был отведен в крайнее правое положение, но одновременно включено движение плунжера 6, так что в полость формы жидкий металл попадал самотеком в нижнюю часть и под давлением плунжера 5 в верхнее пространство формы. Примерно половину пути плунжер 6 двигался со скоростью около 100 мм/с, затем скорость скачком возросла до 170...180 мм/с. Далее плунжер 6 остановился, затем пошел назад, примерно в это же время включился мультипликатор, который замедлил отжатие плунжера, но после включения плунжера 8 давление на металл явно возросло, что усилило возврат плунжера. Внешний вид полученной отливки приведен на рис. 48.

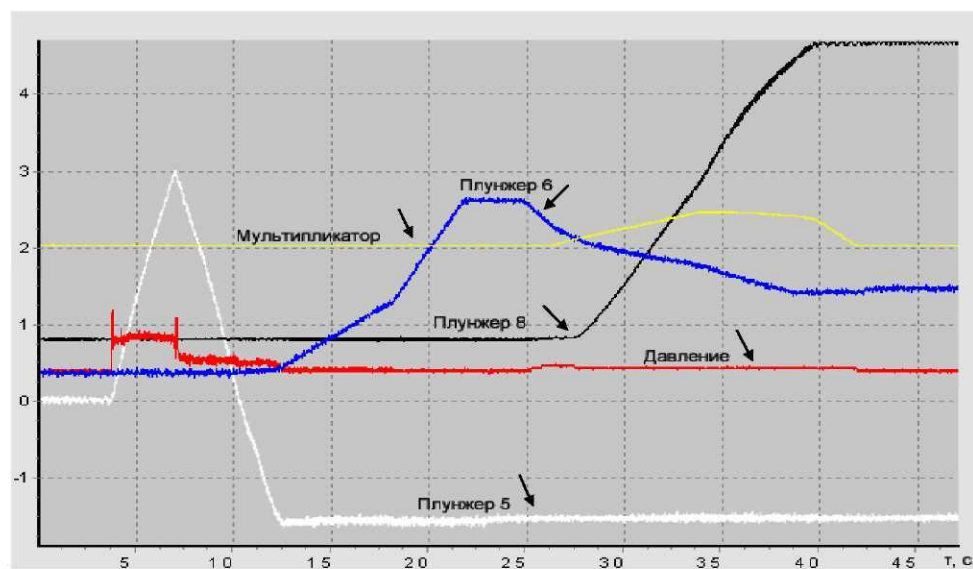


Рис. 47. Раннее наложение давления (плунжер 8); отжим плунжера 6

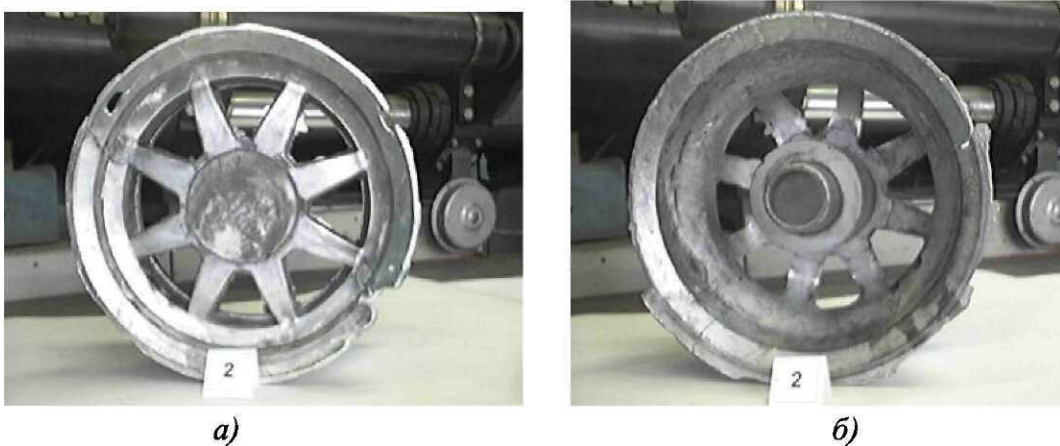


Рис. 48. Полученная отливка (эксперимент 2):
а – вид со стороны лицевой поверхности; б – вид со стороны пресс-остатка

За исключением двух-трех неспаев в тонких сечениях обода отливка оформилась полностью, а пресс-остаток (размер H) по сравнению с предыдущим экспериментом увеличился до 172 мм (см. табл. 5), т.е. отжатие плунжера 6 составило примерно 63 мм. Но, если учесть масштаб, то оказывается, что общий ход плунжера 6 составил 230 мм, движение назад примерно 115 мм и только после повторного включения мультипликатора металл пресс-остатка был сжат на 50... 52 мм, в это же время давлением жидкого металла плунжер 8 был отжат назад. Проблематично здесь то, что после заполнения формы возврат плунжера составил 115 мм. Можно предположить, что при быстром в течение 10 с заполнении произошел захват газов в форме и их последующее сжатие. В течение последующих 3...4 с от контакта с жидким металлом температура, а следовательно, и давление газов в форме возросли настолько, что произошло смещение и плунжера 6, и плиты пресса назад. Дальнейшему движению назад способствовало также включение плунжера 8, который создавал дополнительное давление на металл в полости пресс-остатка. Таким образом, слишком резкое увеличение скорости заполнения формы может сопровождаться захватом газов, которые, в свою очередь, обуславливают разрывы сплошности потока и неполное оформление конфигурации отливки.

Как и в предыдущем эксперименте условия для наложения давления на кристаллизующийся металл не были созданы, поэтому относительный объем металла, пропрессованного по ободу, как видно из табл. 6, не превышает 5 %.

Эксперимент 3.

На циклограмме (рис. 49) видно, что все механизмы пресса сработали по программе. Заполнение камеры прессования жидким металлом происходило в течение 20 с, затем по программе предполагалось включить гидроцилиндр плунжера 5. Это начало заполнения формы. При этом металл в свободном падении заполнял нижнюю полость формы. Через 3...4 с был включен плунжер 6, движение которого продолжалось не более 6 с, в последующие 20 с происходило сжатие металла в пресс-остатке. Задержка запрессовки на 3...4 с, вероятно, играла решающую роль и обеспечила отвод газов из полости формы в вакуумную систему.

Своевременно через 15 с был включен мультипликатор, который обеспечил увеличение усилия на плунжере 6 до 3 МН (300 тс), благодаря чему

опрессовка металла пресс-остатка составила примерно 20 мм. По прошествии 35 с включен плунжер 8, глубина прохода которого во внутрь пресс-остатка составила 24 мм (см. табл. 5). На 120-й секунде осуществлено отключение мультипликатора. При всем том, что необходимые воздействия были выполнены, возникают серьезные опасения за временные интервалы и динамические характеристики этих воздействий. Не исключено, например, что включение плунжера 8 произошло с опозданием на 10...15 с.

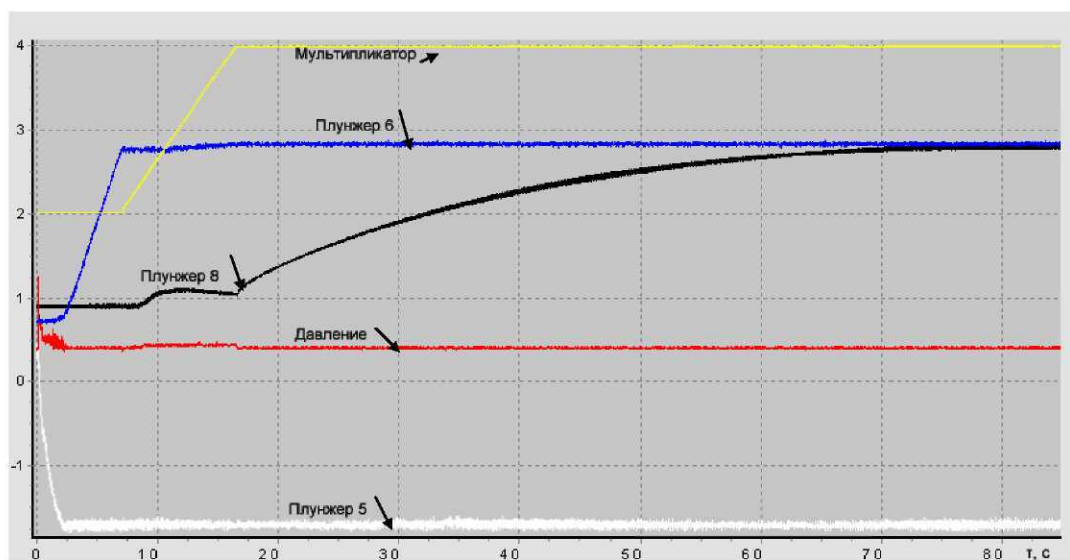


Рис. 49. Позднее наложение давления после срабатывания мультипликатора

Внешний вид полученной отливки приведен на рис. 50, откуда видно, что по сравнению с предыдущими экспериментами формообразование прошло лучше, а грубые дефекты в виде неслитин и неспаев отсутствуют. Вместе с тем при осмотре по наружной поверхности обода выявлены неспаи (рис. 51), а также продольные и поперечные трещины (рис. 52).



Рис. 50. Внешний вид отливки (эксперимент 3):
а – вид со стороны пресс-остатка; б – вид со стороны лицевой поверхности

В верхней части отливки по поверхности обода выявлены зоны, на которые явно распространялось действие давления по внутренним незакристаллизовавшимся объемам (рис. 53). Металл здесь плотный, имеет гладкую чистую поверхность. В таких пропрессованных объемах образование трещин или усадочных раковин полностью исключается. Однако относительный объем пропрессованного металла не превышает 15 % и причина в данном случае в том, что количество залитого жидкого металла превысило требуемое, вместо обычного пресс-остатка 100...110 мм образовался массивный излишек металла ($H = 172$ мм, см. табл. 5), что так же как и в предыдущем случае не позволило эффективно опрессовать металл во всем объеме отливки.



Рис. 51. Неспаи по ободу отливки (эксперимент 3)



Рис. 52. Продольные и поперечные трещины (эксперимент 3)



Рис. 53. Опрессованный участок поверхности обода (эксперимент 3)

Эксперименты 4, 5, 6.

В следующих трех экспериментах переменные параметры процесса удалось в значительной степени стабилизировать. Это наглядно видно на циклограммах (рис. 54, 55, 56), а также по данным табл. 5, 6, 7.

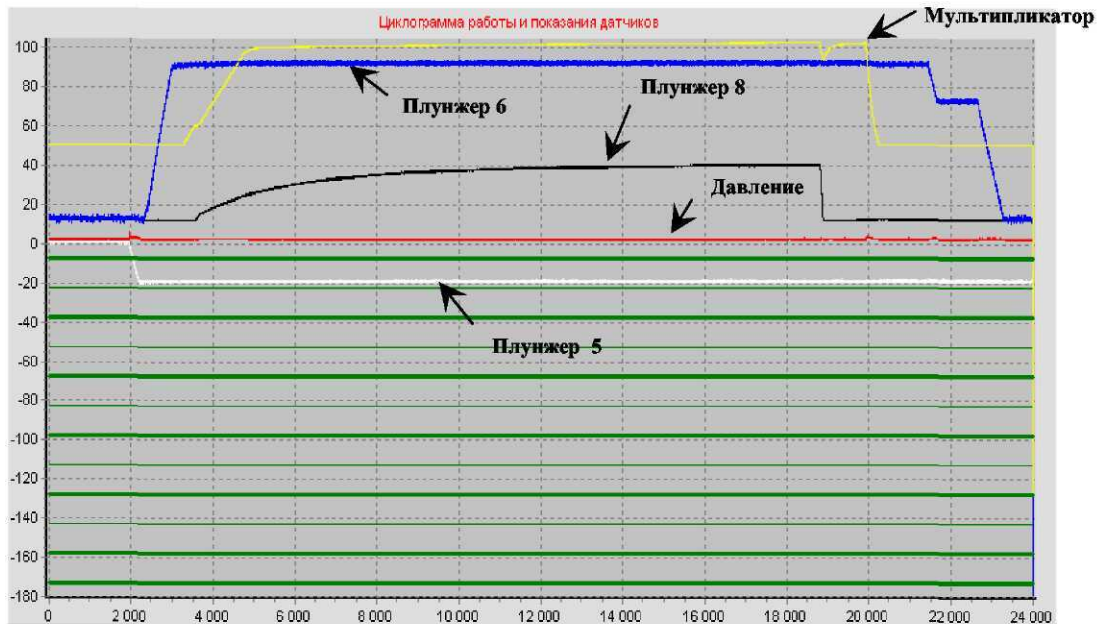


Рис. 54. Циклограмма (эксперимент 4)

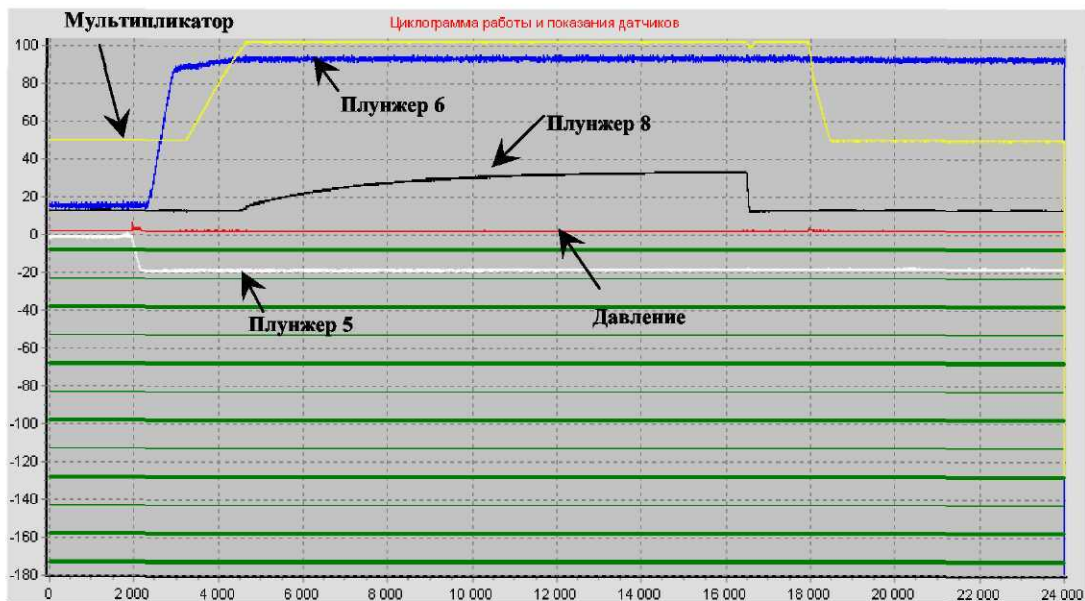


Рис. 55. Циклограмма (эксперимент 5)

Внешний вид отливок, свидетельствующий о полном формообразовании, представлен соответственно на рис. 57, 58, 59. Опрессовка составила

45, 35, 45 %. Опрессованная поверхность обода приведена на рис. 60. На непропрессованных участках выявлены углубления от сжатых газов, неспай и завороты металла (рис. 61), а также трещины (рис. 62). Определенный прогресс в увеличении относительного объема пропрессованного металла достигнут в основном благодаря четкому разделению этапов заливки в камеру опрессовки и заполнения полости формы, а также сравнительно быстрому движению прессующего плунжера 6 (время заполнения формы составило 6...8 с).

На приведенных на рис. 54 – 56 циклограммах обращает на себя внимание последовательное включение гидроцилиндров: сначала отводится плунжер 5, через 1...2 с включается плунжер 6, сразу после его остановки включается мультипликатор, затем плунжер 8. Это связано с ограниченными возможностями гидросистемы, в которой рабочая жидкость от двух насосов подается к гидроцилиндрам по довольно протяженным (более 3 м) трубкам $D_y = 10$ мм. Именно благодаря последовательному и раздельному включению время движения прессующего плунжера удалось сократить до 6...8 с. Но это же последовательное включение привело к тому, что время включения мультиплицирующего плунжера по отношению к моменту окончания заполнения формы отодвинулось на 19...12 с.

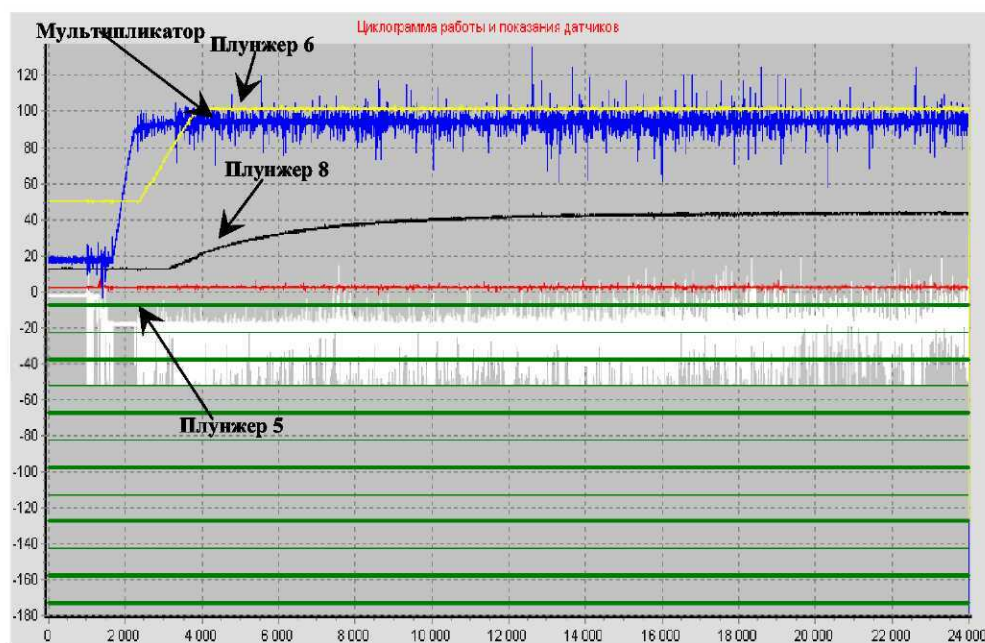


Рис. 56. Циклограмма (эксперимент б)

Это как раз тот отрезок времени, в течение которого срабатывает мультипликатор, развивающий усилие 300 тс (см. рис. 55). Попытка совмес-

тить или сблизить включение мультипликатора и плунжера 8, как видно на рис. 54, существенно не повлияла на качество отливки. Плунжер 6 очень медленно – в течение 60...80 с внедряется внутрь пресс-остатка на глубину 53, 33 и 47 мм. Указанный характер движения плунжера обусловлен тем, что он преодолевает сопротивление металла, который уже сжат плунжером 6.



Рис. 57. Полученная отливка (эксперимент 4)

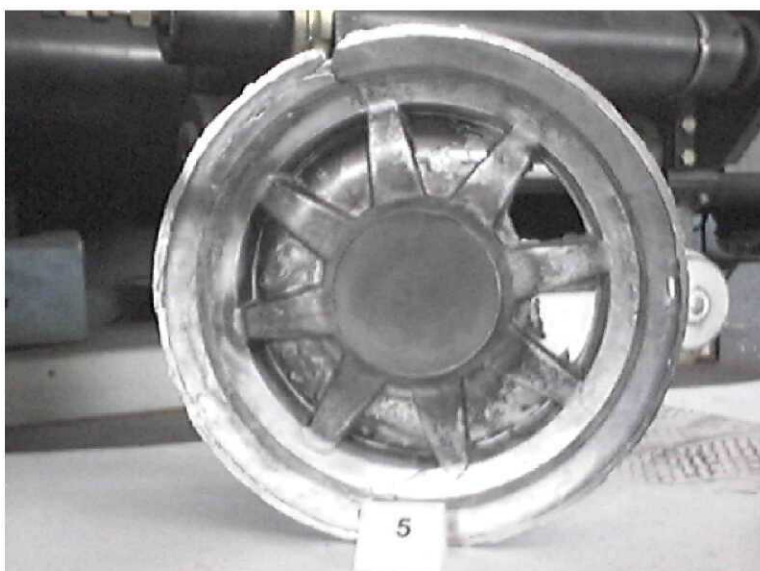


Рис. 58. Полученная отливка (эксперимент 5)

При внедрении плунжера 8 внутрь пресс-остатка на глубину $h = 53$ мм компенсация усадки по отношению ко всему объему металла составляет 2 %, а по отношению только к пресс-остатку примерно 7%.

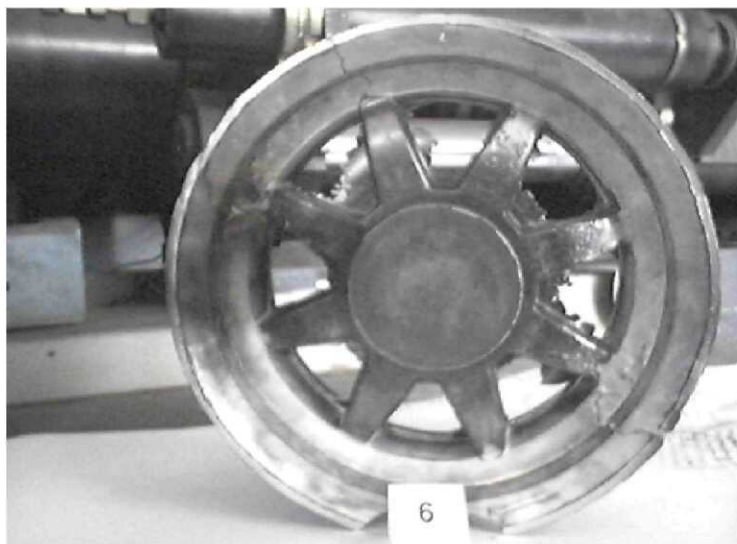


Рис. 59. Полученная отливка (эксперимент 6)

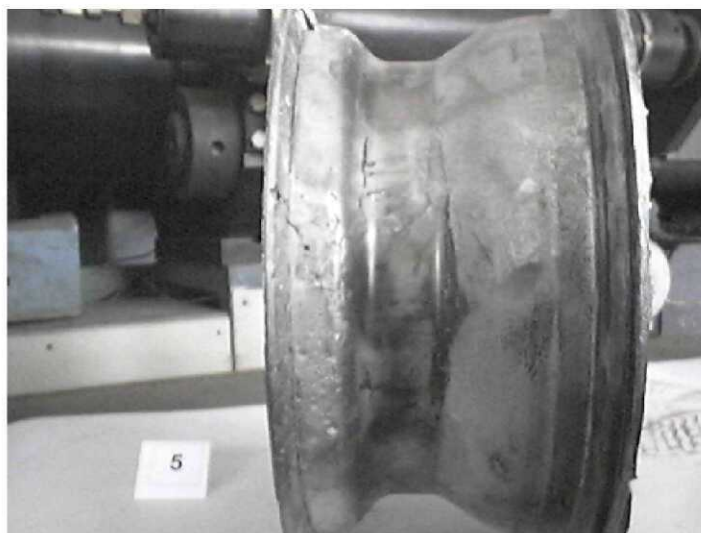


Рис. 60. Опрессовка (эксперимент 5)

Во всех без исключения случаях металл пресс-остатка был полностью пропрессован, а это возможно лишь в том случае, когда компенсация усадки составляет 10...12 %. Отсюда можно сделать предположение, что на 3... 5 % усадка компенсируется за счет плунжера 6 и примерно на 7 % при наложении давления на кристаллизующийся металл плунжером 8. При этом, если учесть временные интервалы, нельзя предположить, что опрес-

совка обода осуществлялась через 15...20 с после заполнения формы и продолжалась в течение 50...100 с. Следовательно, достигнутая опрессовка обода может быть связана исключительно с наложением давления с помощью прессующего плунжера в момент окончания заполнения формы; действие плунжера 8 распространяется только на массивный пресс-остаток.

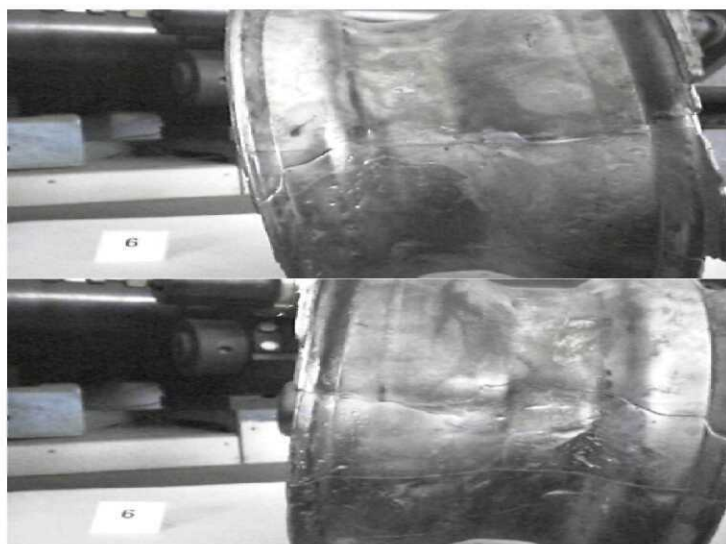


Рис. 61. Недостатки отливки (эксперимент 6)



Рис. 62. Трещины по ободу диска (эксперимент 4)

Эксперименты 7, 8, 9, 10.

В предыдущей серии экспериментов было отмечено, что плунжер 8, предназначенный для наложения давления на незакристаллизовавшийся

металл и распространения этого давления в самые удаленные объемы отливки по внутренним дефектам в междендритных пространствах, работает медленно и неэффективно.

Циклограмма на рис. 63 в полной мере повторяет эту закономерность. Включение плунжера 8 произошло через 9 с после заполнения формы. Зависимость объема металла, запрессованного на компенсацию усадки, имеет характер, близкий к линейному. Процесс запрессовки продолжается около 30 с. Внедрение плунжера в пресс-остаток составило 100 мм. В пересчете на весь объем отливки компенсация усадки составила примерно 4 %.

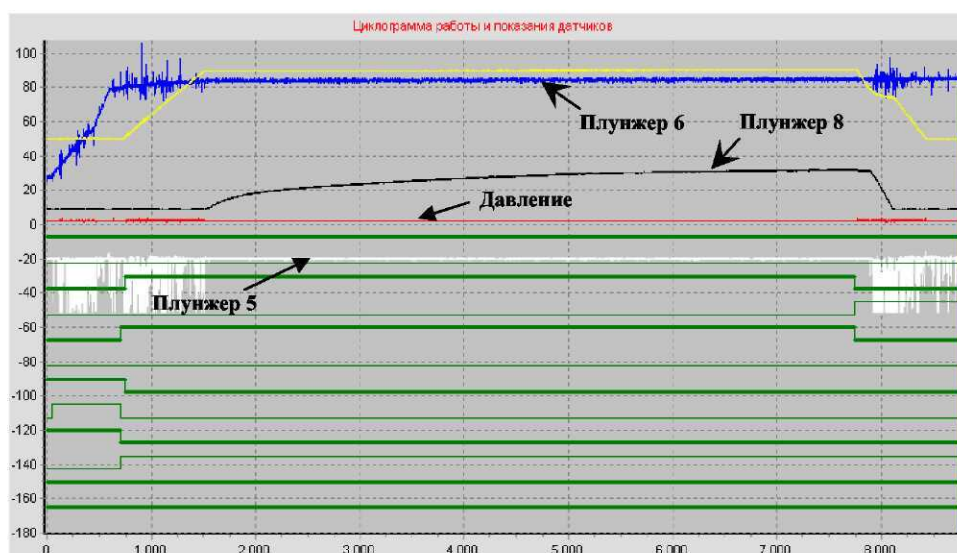


Рис. 63. Циклограмма (эксперимент 7)

Теоретическая оценка сжимаемости жидкого металла может быть осуществлена следующим образом. Согласно зависимости Клапейрона – Клаузиуса изменение равновесной температуры кристаллизации под действием давления со сжимаемостью ε может быть связано зависимостью

$$\frac{dt}{dp} = \left(\frac{V_{\text{ж}} - V_{\text{тв}}}{V_{\text{тв}}} \right) \frac{t_{\text{кр}}}{L\rho} = \varepsilon \frac{t_{\text{кр}}}{L\rho}. \quad (46)$$

По экспериментальным данным [107] для чистого алюминия

$$\frac{dt}{dp} = 6,33 \cdot 10^{-2} \frac{\text{К}}{\text{МПа}}.$$

Подставляя значение $\frac{dt}{dp}$, а также величины плотности и скрытой теплоты кристаллизации L в формулу (46), получим

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{ж}} - V_{\text{тв}}}{V_{\text{тв}}} = \frac{dt}{dp} \frac{L\rho}{t_{\text{кр}}} = \frac{6,33 \cdot 10^{-2} \cdot 394 \cdot 10^3 \cdot 2,55 \cdot 10^3}{10^6 \cdot 645} = 9,84 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кН} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}}{\text{Н} \cdot \text{к} \cdot \text{м}^3}. \quad (47)$$

Это очень важный результат, с которым в соответствии находятся результаты непосредственных измерений компенсации усадки на целом ряде отливок из различных сплавов [79]. Если переход из жидкого в твердое состояние связан с относительным изменением объема порядка 10 %, то достигнутой в эксперименте 7 опрессовки, составляющей в среднем 4 %, явно недостаточно, что и нашло выражение в таких дефектах, как рыхлота, пористость, шероховатая поверхность по ободу («мороз»).

В то же время приведенное здесь значение, характеризующее сжимаемость жидкого металла, можно рассматривать как некоторый предел при расчете опрессовки. С этой точки зрения, принимая, что ступица и спицы колеса опрессованы полностью, можно расчетным путем определить фактическую опрессовку обода.

Результаты выполненных расчетов для экспериментов данной серии приведены в табл. 9.

Таблица 9

Фактическая опрессовка отливки по зонам, разноудаленным от центра

Эксперимент	Время за-прессовки металла в форму, с	Момент начала наложения давления, с	Объем запрессованного металла, см ³	Спицы, %	Обод, %	Примечание
7	6	16	230	10	2,6	Опрессовка в течение 45 с
8	4	10	253	10	4	50 % объема запрессовано в первые 10 с
9	4,5	15	200	10	1,7	60 % объема запрессовано в первые 3 с
10	5	16	276	10	5	80 % объема запрессовано в первые 3 с

В расчетах принято, что общий объем металла составляет 4000 см^3 , объем пресс-остатка 1152 см^3 за вычетом объема запрессованного металла, объем спиц 600 см^3 , объем обода 2248 см^3 . Опрессовка пресс-остатка – 10 %. Из табл. 8 видно, что во всех экспериментах количества запрессованного металла оказалось достаточно для опрессовки ступицы (пресс-остатка) и спиц. Избыток запрессованного металла, доставленного до обода, позволил создать опрессовку на 1,7 % в эксперименте 9 и на 5 % в эксперименте 10. Дефицит запрессованного металла в эксперименте 10 составил 124 см^3 . Для достижения полного уплотнения металла в ободу ход мультиплицирующего плунжера необходимо увеличить на 55 мм.

Заслуживает внимания, судя по циклограммам, что, начиная с эксперимента 8 ход кривой, характеризующей наложение давления на кристаллизующийся металл, претерпел существенные изменения. В отличие от монотонного на рис. 49, 54, 55, 56, 63 (эксперименты соответственно 3, 4, 5, 6, 7), в эксперименте 8 (рис. 64) временной интервал относительно быстрого перемещения плунжера 8 состоит из двух участков; на первом – в течение 5 с зависимость приобретает экспоненциальный характер, на втором – резкий бросок сменяется медленным затухающим по экспоненте перемещением плунжера 8 аналогично графикам на рис. 49, 54, 55, 56, 63.

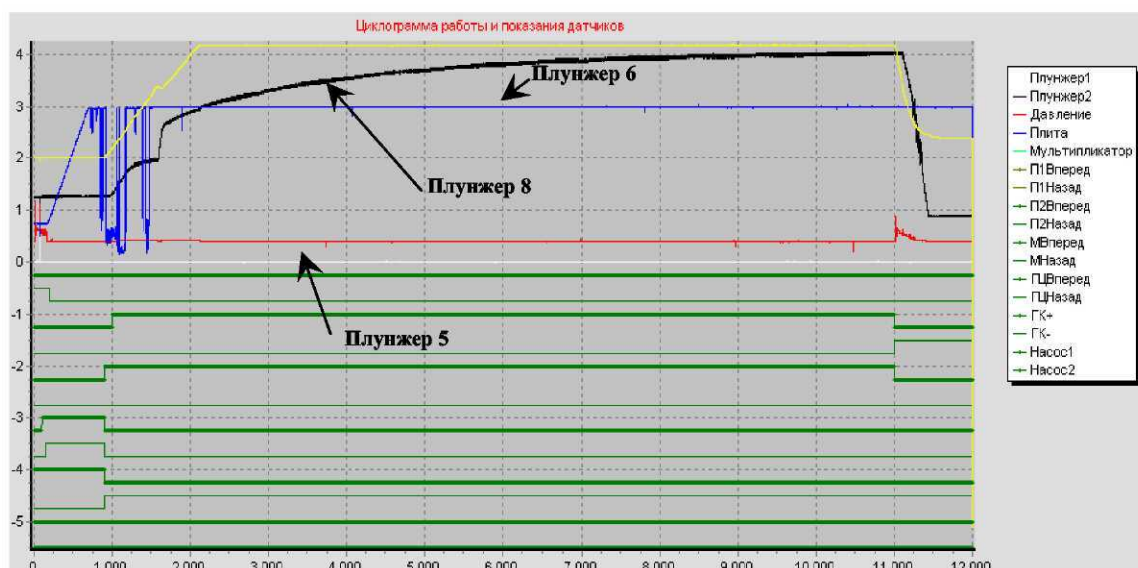


Рис. 64. Циклограмма (эксперимент 8)

В следующем эксперименте 60 % от общего объема металла запрессовано в первые 3 с, 40 % – в течение примерно 40 с (рис. 65). Наконец, в эксперименте 10 (рис. 66) в первые 3 с запрессовано примерно 80 % общего объема металла.

Можно предположить, что во время расплавления с ростом температуры изменение объема и межатомных расстояний принимает неаддитивный характер. Атомы в жидком состоянии занимают объем на 10 % больший, чем тот объем, в который их можно плотно упаковать. Следовательно, в расплавленном металле образуются разрывы сплошности, вакуум, который заполняется газами. В процессе кристаллизации объем уменьшается, газы выходят из раствора и диффундируют в усадочные раковины, поры, рыхлоты. При наложении давления атомы механически сжимаются, а газовая фаза при этом проявляет свое специфическое свойство – сжиматься в значительно более широких пределах по сравнению с металлом при сравнительно невысоких давлениях. Поэтому внедрение плунжера 8 внутрь пресс-остатка обеспечивает возможность сжимать жидкий металл при температуре выше температуры кристаллизации, когда податливость металла, измеряемая отношением изменения объема к изменению давления, зависит исключительно от сжимаемости газов. Формальный признак – наличие скачка при внедрении плунжера, по накопленному опыту, принято воспринимать как одно из важнейших условий эффективного наложения давления на кристаллизующийся металл. Применительно к заготовке автомобильного диска это тем более важно, что в течение кратчайшего отрезка времени запрессовывается значительный объем металла и создается достаточно высокое давление. На циклограмме (рис. 66) видно, что, несмотря на то, что мультипликатор сработал и достигнута опрессовка плунжером 6, под влиянием давления, созданного плунжером 8, произошло отжатие плиты с плунжером 6.

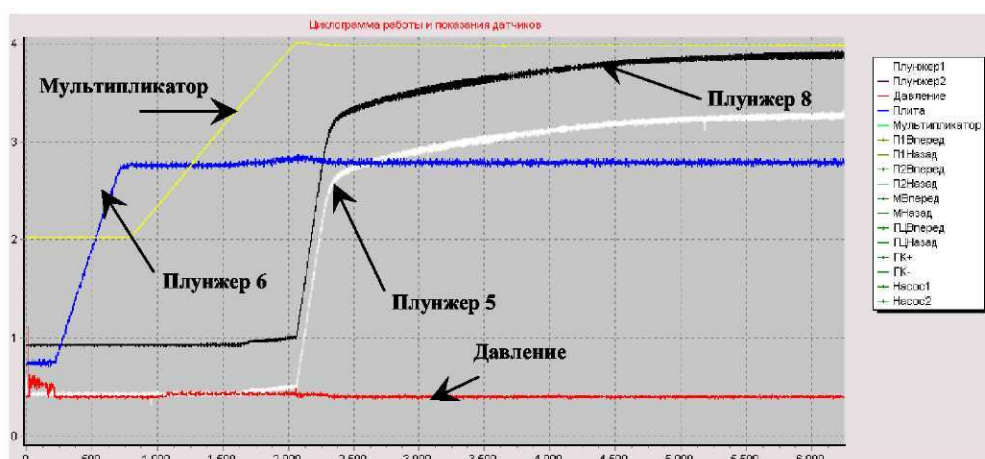


Рис. 65. Циклограмма (эксперимент 9)

Изменение характера зависимости можно связать с двумя причинами. Во-первых, в экспериментах 8, 9, 10 время запрессовки металла в полость формы сократилось до 4...5 с. Во-вторых, за счет расточки стержня 4 (см. рис. 42) по внутренней поверхности толщину обода увеличили на 2,5...3 мм. Это позволило свести к минимуму влияние опрессовки плунжером 6 и технологической задержки до момента остановки мультипликатора.

Характер движения мультиплицирующего плунжера в самые первые моменты времени после его включения вправе рассматривать как индикатор состояния металла в отливке. В идеальном варианте, если давление накладывается на жидкий металл, то ход плунжера должен обеспечить запрессовку примерно 10% общего объема металла. Если этого не произошло, значит весь металл (или его часть) закристаллизовался до наложения давления.

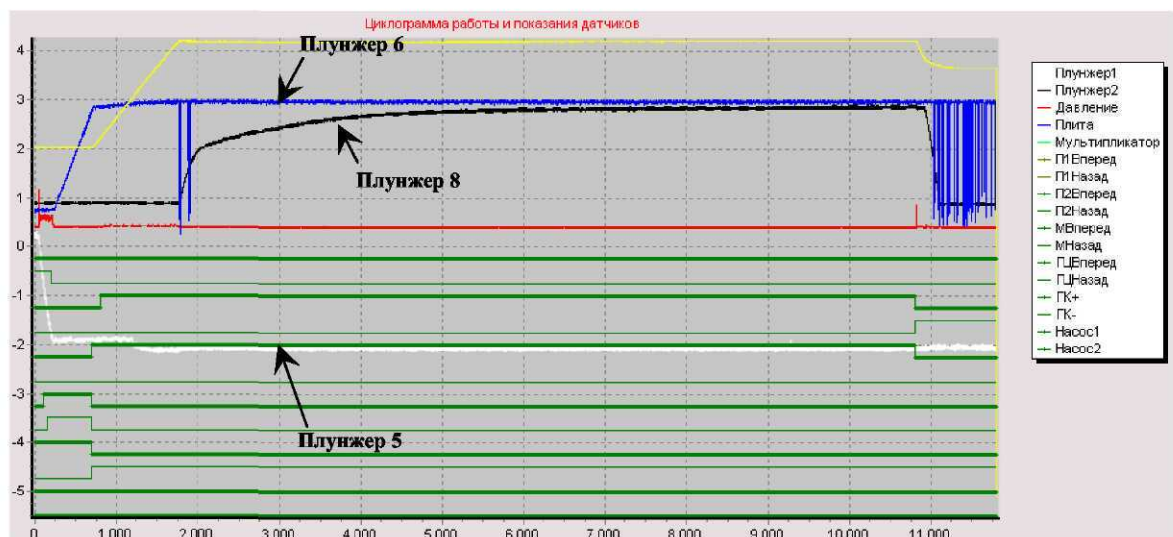


Рис. 66. Циклограмма (эксперимент 10)

Тогда монотонный характер движения плунжера 8 можно объяснить тем, что во время кристаллизации происходит усадка, объем уменьшается, и плунжер запрессовывает металл, необходимый для восполнения отмеченного уменьшения объема.

Отсюда видно, что наложение давления на кристаллизующийся металл может происходить по двум качественно различным схемам.

Схема 1.

Давление накладывается на жидкий металл при температуре, выше температуры начала кристаллизации. За счет сжатия газов при соответствующем давлении достигается сближение атомов и кристаллогеометрическое

соответствие жидкой и твердой фаз. Создавая условия для направленного отвода теплоты перегрева и скрытой теплоты кристаллизации, можно при устойчивом управлении перевести металл в твердое состояние, избежав характерных для обычной кристаллизации дефектов.

Схема 2.

Давление накладывается на металл, когда часть объема, обычно тонкие сечения или удаленные элементы, уже закристаллизовалась, причем давление накладывается либо на перегретый металл, либо на металл, который находится в двухфазном состоянии.

Что касается закристаллизовавшихся объемов, то их структура и плотность могут быть частично исправлены за счет продавливания перегретого металла сквозь решетку кристаллов, имеющих дефекты строения, как уже отмечалось, в виде вакансий, дислокаций, раковин, пор и рыхлот. Но для осуществления такого процесса необходимо создавать высокое давление. Высокое давление необходимо также для преодоления сопротивления металла, который находится в двухфазном состоянии. Характерным для данной схемы является медленное движение плунжера, как бы отслеживающее кристаллизацию и усадку металла.

Эксперимент 11.

Цель данного эксперимента – снижение газовых раковин при одновременном повышении эффективности наложения давления.

Из предыдущих экспериментов видно, что увеличение скорости заполнения позволяет наложить давление на весь металл или его часть до начала кристаллизации. Но быстрое заполнение неизменно связано с захватом газов. Поэтому было принято решение изменить режим движения металла в форме путем его прокачки через одну спицу, направленную вниз. На рис. 67 приведена измененная форма контрплунжера, обеспечивающая изменение направления потока металла. Предполагалось, что под давлением прессующего плунжера металл с достаточно большой скоростью пройдет до обода и, поднимаясь вверх двумя потоками, будет заполнять спицы и обод, вытесняя газы в вакуумную систему. Но особое внимание уделялось проверке возможности поддержания металла в подвижном состоянии, чему не в малой степени должна была способствовать непрерывная подпитка

потока перегретым металлом, продавливаемым между закристаллизовавшимися стенками по принципу «перегретый металл расплавляет закристаллизовавшийся до конца заливки».



Рис. 67. Передняя поверхность контрпунжера 5

По циклограмме на рис. 68 и по внешнему виду отливки можно сделать вывод, что, несмотря на то, что заполнение продолжалось 20 с, наложение давления плунжером 8 удалось в значительной степени осуществить по схеме 1. Включение плунжера 8 осуществлено на 3-й секунде после подачи давления рабочей жидкости в мультипликатор. В течение 0,5...0,6 с плунжер 8 прошел внутрь пресс-остатка на глубину 75...80 мм. Изменение объема металла (обжатие) составило 150...160 см³. В течение последующих 65...70 с плунжер углубился еще на 45...50 мм, общий объем запрессованного металла составил примерно 250 см³, что на 150 см³ меньше, чем

требуется. По внешнему виду отливки выявлено, что формообразование прошло полностью, но обод пропрессован только в окрестностях спиц (рис. 69).

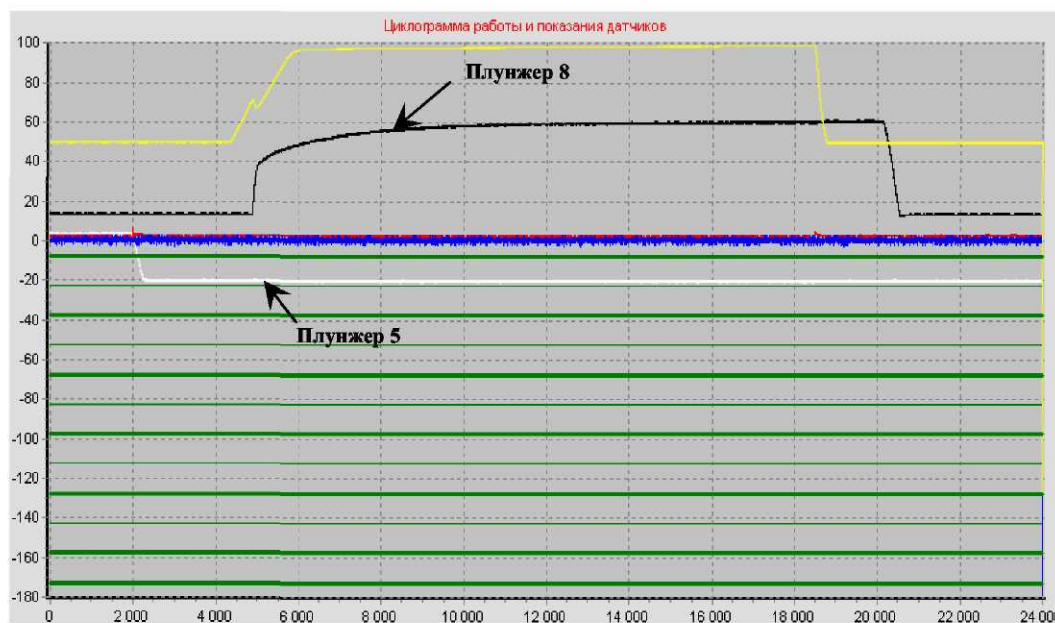


Рис. 68. Циклограмма (эксперимент 11)

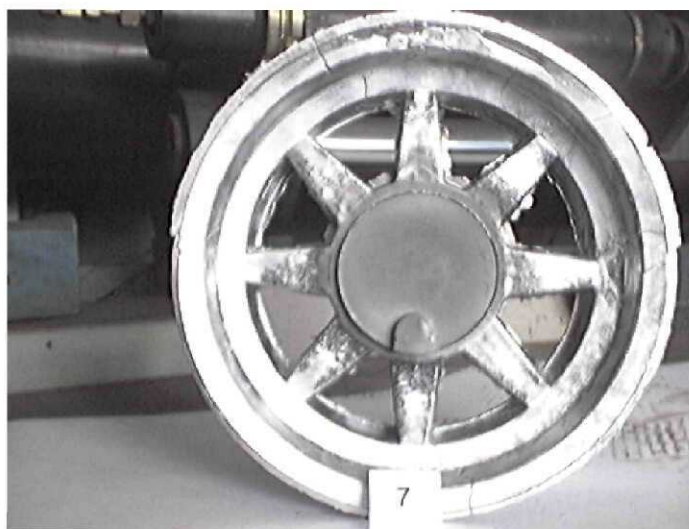


Рис. 69. Полученная отливка (эксперимент 11)

Выполненные эксперименты позволили получить обширную информацию и выявить следующие общие закономерности протекания процесса:

– при заполнении полости формы жидкий металл растекается по большей поверхности, проходит в контакте с формой значительные расстояния и при температуре заливки $780...800\text{ }^{\circ}\text{C}$, начальной температуре формы

280 °С и времени заполнения 5...6 с опасность остановки потока, образования неспаев и заворотов металла и как следствие неполного формообразования отливки остается реальной;

– одной из главных причин брака отливок является несоответствие динамических свойств гидропривода пресса требуемым значениям; в частности время срабатывания мультипликатора слишком велико и не позволяет осуществлять опрессовку металла до начала его кристаллизации;

– наложение давления прессующим плунжером достаточно эффективно и стабильно обеспечивает формообразование отливки, но опрессовка распространяется в основном на пресс-остаток, что может привести к торможению мультиплицирующего плунжера;

– наиболее эффективным вариантом наложения давления на отливку типа «Автомобильный диск» следует признать опрессовку металла в жидком состоянии до начала кристаллизации;

– заполнение формы через массивный питатель (см. рис. 6б), хотя и снижает брак по газовым раковинам, заметно замедляет процесс заполнения формы;

– одновременное заполнение сегментов колеса через все спицы необходимо осуществлять в условиях интенсивного вакуумирования во всем объеме, а не только в верхней зоне полости формы.

Заключение по результатам выполненных исследований. Сравнение результатов выполненных экспериментов показывает, что при всем различии и варьировании исходных параметров и технологических режимов формообразования и опрессовки металла требуемое качество отливки достигнуто не было. Наилучшее приближение, полученное в экспериментах 10 и 11, позволяет оценить, насколько эффективно реализована принципиальная схема и какие дополнительные меры необходимо принять для улучшения процесса.

Прежде всего необходимо отметить, что выполненные эксперименты не в достаточной степени подготовлены как с точки зрения теоретического обоснования временных и температурных интервалов наложения давления, так и в отношении информационного и технологического обеспечения (отсутствие датчиков, ограниченные возможности пресса). Кроме того, принятая принципиальная схема процесса, не имеющая аналогов ни в отечественной, ни в мировой практике, отрабатывалась исключительно на сплаве В95 без должной защиты от окисления, пленообразования и зашлаковывания. Поэтому полученные в экспериментах результаты дают пред-

варительные ориентировочные представления о новом процессе, для дальнейшего развития и совершенствования которого необходимо более глубоко и детально проработать следующие вопросы.

1. Теоретически обосновать гидродинамические режимы заполнения полости формы.

2. Обеспечить наложение давления на жидкий металл во всем объеме отливки.

3. Обеспечить запрессовку металла, относительный объем которого не менее 10 %.

4. Оптимизировать параметры процесса, разработать систему регулирования и управления.

5. Подобрать сплав, не уступающий по механическим свойствам В95, но превосходящий его по литейным (технологическим).

6. Изыскать возможность улучшения динамических характеристик гидропривода пресса за счет использования принципа аккумуляции энергии.

4.3. Разработка математической модели теплового взаимодействия расплава с материалом формы

Выполненные экспериментальные исследования позволили значительно продвинуться на пути создания новой технологии производства литых автомобильных дисков. Вместе с тем продолжение этих исследований без должного теоретического анализа признано нецелесообразным.

Повторение результатов и выявление дефектов, свидетельствующих о недостаточно эффективном наложении давления на кристаллизующийся металл, наводят на предположение, что взятая в рассмотрение принципиальная схема процесса не может быть реализована, потому что гидродинамические режимы заполнения не приведены в соответствие с параметрами теплового взаимодействия.

Теплообмен в режиме ламинарного течения. Заполнение полости формы при литье автомобильных дисков происходит не путем «прострела» всего пространства от центра до кромки обода, как это происходит при литье под давлением, а смешанным путем, включающим быстрое течение в спицах и относительно медленное растекание металла по поверхности обода. В этом смысле разрабатываемый процесс производства сложных фасонных отливок по условиям заполнения и теплообмена сочетает особенности, характерные для литья под давлением, жидкой штамповки, ко-

кильного литья, что обусловлено, как уже отмечалось выше, стремлением использовать сравнительно простое, надежное и компактное технологическое оборудование. А поскольку наибольшую опасность представляет остановка металла во время заполнения, важно оценить, в каких временных границах, растекаясь по поверхности формы, расплав теряет перегрев. Предполагается при этом, что в исходном состоянии температура расплава $t_{ж.м}$ распределена во всем объеме равномерно, а при растекании в контакте с поверхностью металл охлаждается, вязкость его возрастает, по сечению потока устанавливается вполне определенное поле скоростей, что в конечном итоге приводит к остановке некоторого пристеночного слоя. Этот слой сначала теряет перегрев, затем выделяет скрытую теплоту кристаллизации, оставаясь в контакте в силовом и тепловом взаимодействии с движущимся расплавом (рис. 70, а, б).

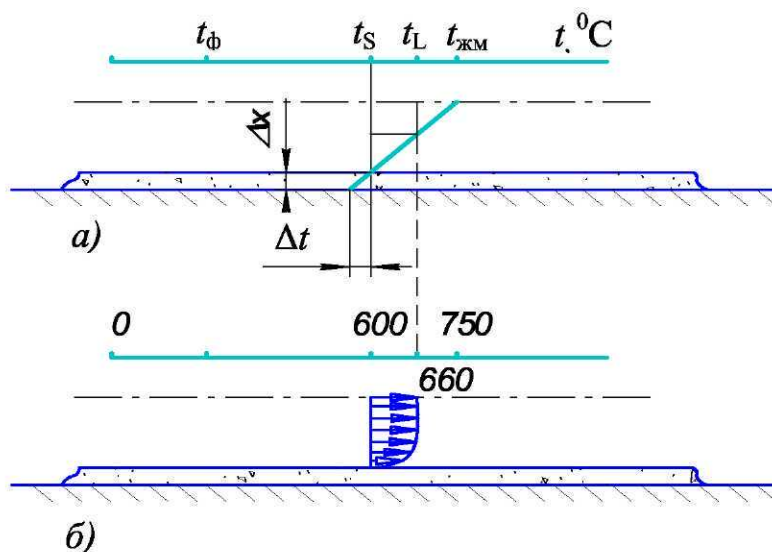


Рис. 70. Схема распределения температур в сечении потока металла:

- а – экстраполяция градиента температурного поля;
- б – температурное поле с учетом турбулентного режима движения потока

Удельный тепловой поток от расплава в общем случае может быть рассчитан по формуле Ньютона

$$q = \alpha(t_{ж.м} - t_\phi), \quad (48)$$

где α – коэффициент теплоотдачи.

С другой стороны,

$$q = \lambda_p \frac{\partial t}{\partial x} = \lambda_\phi \frac{\partial t}{\partial x}. \quad (49)$$

где λ_p – коэффициент теплопроводности расплава, λ_ϕ – коэффициент теплопроводности материала формы.

На основании непосредственных измерений распределения температур в сечении стенки формы и расчетов установлено, что в момент контакта расплава с формой $q = 1,4 \dots 1,6 \cdot 10^6$ Вт/м².

В то же время

$$q = \frac{dQ}{d\tau} = p[c(t_{ж.м} - t_L) + L] \frac{\partial \xi}{\partial \tau} d\tau, \quad (50)$$

где Q – количество теплоты, отданной расплавом, c – теплоемкость жидкого металла, L – скрытая теплота кристаллизации, p – плотность жидкого металла. Принимая $L = 394 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$, $(t_{ж.м} - t_L) = 200$ К, $p = 2350 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, нахо-

дим, что скорость кристаллизации $\frac{\partial \xi}{\partial \tau} = 1 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$, что вполне согласуется с данными [14, 93] и может быть использовано для предварительной оценки распределения температуры в сечении потока (см. рис. 70, а). С учетом (49) градиент по сечению потока составляет $\frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{1,5 \cdot 10^6}{80} = 18,75 \cdot 10^3 \frac{\text{К}}{\text{м}}$.

Линейная экстраполяция до оси потока показывает, что в канале толщиной 20...22 мм средняя температура на 70...80 К ниже $t_{ж.м}$. В дальнейшем темп охлаждения в данном сечении значительно снижается, но в удаленные полости формы металл приходит с более низкой температурой и вероятность остановки потока становится реальной уже через 3...4 с. Поэтому важно заполнение формы осуществлять с максимальной скоростью и в то же время не допустить переход в режим турбулентного течения.

С учетом того, что $t_\phi = 280$ °С, находим

$$\alpha = \frac{1,5 \cdot 10^6}{750 - 250} = 3200 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}.$$

С другой стороны, принимая во внимание известные критериальные уравнения [105, 119], установленное значение α можно использовать для определения скорости потока.

$$\alpha = \frac{\lambda}{l_0} N_u = 0,0827 Re^{0,8} Pr \frac{\lambda}{l_0} = k \left(\frac{\omega x}{\nu} \right)^{0,8} \frac{\nu}{a} \frac{\lambda}{l_0}, \quad (51)$$

где ω – скорость потока, ν – коэффициент кинематической вязкости, x – продольная координата, a – коэффициент температуропроводности жидкого металла, l_0 – характерный размер отливки, λ – коэффициент теплопроводности.

$$\text{Критерий Прандтля } Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{6 \cdot 10^{-7}}{300 \cdot 10^{-7}} = 2 \cdot 10^{-2}.$$

$$\text{Критическое число Рейнольдса } Re = \frac{\omega x}{\nu} \leq 3000.$$

Отсюда $x = 0,029$ м; $l_0 = 0,025$ м; $\omega = 0,062$ м/с.

За время $\tau = 1$ с поток проходит расстояние $0,062$ м, что соответствует размеру спиц, сечение которых должно быть выбрано с учетом требуемого расхода металла и его охлаждения в контакте с формой. Объем металла отливки составляет 4250 см^3 . Суммарное сечение спиц для скорости 62 см/с должно составить 137 см^2 . По конструктивным соображениям $+\Sigma F = 60 \text{ см}^2$ и фактическое время заполнения составляет $10 \dots 12$ с.

Теплообмен в режиме турбулентного течения. Возможности гидропривода позволяют поднять скорость движения прессующего плунжера и за счет этого увеличить скорость движения металла в спицах. В экспериментах 10 и 11 время заполнения доведено до $5 \dots 6$ с, что соответствует скорости $\omega = 11 \dots 12 \text{ см/с}$ и числу Рейнольдса $Re = 6000$. Такой режим опасен тем, что возникающие вихри и разрывы сплошности создают условия для захвата и накачки в расплав газов из полости формы. В то же время в условиях повышенного гидродинамического давления возникающие в пристеночных слоях кристаллы отрываются от поверхности, замешиваются в поток, распределение температур и скоростей в котором приобретает более равномерный характер, что и представлено на рис. 70, б.

При прочих одинаковых условиях увеличение числа Рейнольдса согласно зависимости (51) влечет за собой увеличение коэффициента теплоотдачи и уменьшение времени заполнения может оказаться недостаточным для сохранения перегрева расплава. Эти взаимоисключающие тенденции графически представлены на рис. 71, где охлаждение расплава проиллюстрировано зависимостью $\Theta = f(\tau)$, фактически снижением перегрева во времени в двух режимах заполнения.

Приведенные зависимости показывают, что при данном объеме металла и проходном сечении спиц время заполнения несопоставимо больше вре-

мени снятия теплоты перегрева независимо от режима заполнения, что полностью соответствует экспериментально полученным результатам.

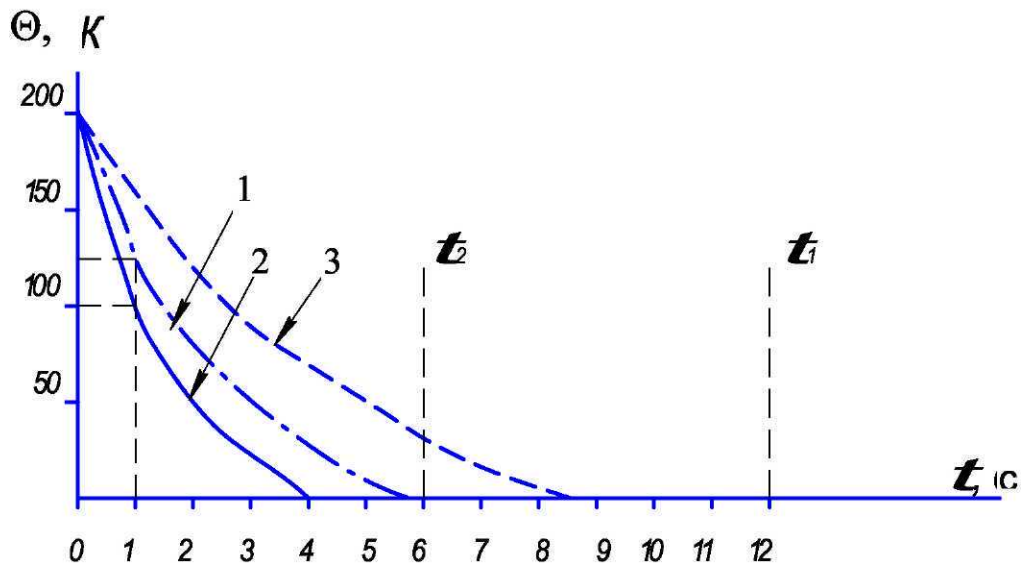


Рис. 71. Зависимость перегрева от времени течения расплава.
 Обозначения: 1 – ламинарный режим; 2 – турбулентный режим;
 3 – то же при наличии термического сопротивления; τ_1 – время
 заполнения в ламинарном режиме; τ_2 – то же в турбулентном режиме

Снижение интенсивности теплообмена. В расчете теплового взаимодействия предполагалось, что расплав входит в непосредственный физический контакт с материалом формы. Но при скоростях течения 6... 12 см/с, характерных для гравитационного литья в металлические формы, для снижения интенсивности теплообмена может быть использована кокильная краска, которая с помощью кисти или пульверизатора наносится перед каждой заливкой на рабочую поверхность формы. Термическое сопротивление краски связано с теплопроводностью $\lambda_{кр}$ и толщиной слоя δ зависимостью

$$K = \frac{\delta}{\lambda_{кр}}. \quad (52)$$

При данном значении удельного теплового потока перепад температур в слое

$$\Delta t = \frac{q}{K}. \quad (53)$$

Так, при толщине слоя $\delta = 0,1$ мм меловой краски $\Delta t = 100$ К. Этого достаточно, чтобы время заполнения в режиме 2 привести в соответствие со временем снятия теплоты перегрева (зависимость 3 на рис. 71).

Практические рекомендации. Выполненные расчеты показывают, что интенсивность отвода теплоты перегрева во время заполнения формы металлом настолько велика, что изменением гидродинамических режимов, от которых зависит время заполнения, обеспечить наложение давления до начала кристаллизации отливки не представляется возможным. В этих условиях наиболее эффективным и практически достаточно просто реализуемым технологическим приемом может послужить нанесение слоя кокильной краски на рабочую поверхность формы. В то же время достаточно очевидным является вывод о том, что все параметры технологического процесса, такие как: начальная температура формы; температура расплава; скорость и время заполнения формы; толщина и состав слоя краски, должны выдерживаться на неизменном уровне с высокой точностью, что возможно только в условиях использования программного управления процессом.

4.4. Технология производства автомобильных дисков из высокопрочного алюминиевого сплава АЛ246

Продолжение исследований с целью отработки процесса получения литых дисков из сплава В95 на существующем оборудовании признано нецелесообразным по целому ряду причин: несоответствие технологических возможностей пресса, окисляемость сплава в процессе плавки, сравнительно высокая температура плавления. Вместе с тем это вовсе не означает, что исследования в данном направлении бесперспективны. Напротив, даже на таких сложных с точки зрения литья отливках, как автомобильный диск достигнут высокий процент опрессовки металла и при этом установлено, что в пропрессованных объемах металл имеет плотную однородную структуру, высокую точность и высокое качество поверхности. Дальнейшие усилия предстоит сосредоточить на создании специального оборудования для производства литых автомобильных дисков из высокопрочных деформируемых алюминиевых сплавов.

На данном этапе с учетом гидродинамических условий заполнения и теплового взаимодействия расплава с материалом формы исследования продолжены на высокопрочном алюминиевом сплаве АЛ246, который в отличие от сплава В95 имеет температуру плавления 520...525 °С, что примерно на 50 К ниже, чем у сплава В95, и по своему составу разработан для литья под давлением и кокильного литья с учетом сопротивляемости окислению при длительной выдержке в раздаточных печах.

Подготовка технологической оснастки. Для обеспечения равномерного заполнения всей полости формы предпочтение отдано плоской торцевой поверхности контрплунжера 5, а для повышения эффективности наложения давления на жидкий металл длина штока мультиплицирующего плунжера 11 увеличена на 100 мм, так что обеспечена опрессовка металла не только в камере прессования 13 (см. рис. 42), но и за ее пределами в полости формы. Нанесением щелевидных каналов 14 по торцевым поверхностям стержня отвод газов из полости формы осуществляли путем вакуумирования специально предусмотренной кольцевой полости в детали 1.

Прогрев формы перед заливкой проводится в два этапа. На первом этапе – до температуры 120...130 °С, после чего на внутреннюю поверхность стержня 4, на лицевые поверхности вкладышей 2 и 3 наносится из пульверизатора кокильная краска следующего состава: 10 % – мел, 10 % – тальк, 80 % – вода; связующее – жидкое стекло 2...3 % от объема краски. На втором этапе осуществляются сборка оснастки и разогрев до температуры 270...280 °С с помощью газовой горелки. Трущиеся металлические поверхности деталей оснастки 11, 12, 13 во избежание задиров смазываются эмульсией коллоидно-графитового препарата SN-2000.

Корректировка управляющей программы. Важное изменение в последовательности временных интервалов включения гидроцилиндров с учетом динамических свойств гидросистемы состоит в том, что в момент окончания заполнения формы и остановки прессующего плунжера 6, как видно на циклограмме (рис. 72), включается мультиплицирующий плунжер 8, который при наложении давления на всю массу незакристаллизовавшегося металла отливки практически без сопротивления проходит значительное расстояние, потребляя при этом значительные ресурсы гидросистемы. С интервалом 2...3 с включается мультипликатор, который по мере замедления плунжера 8 и роста давления на металл создает в гидроцилиндре плунжера 8 давление до 100 МПа, достаточное для удержания давления, развиваемого на металл в камере прессования 7 (см. рис. 42).

Наложение давления на кристаллизующийся металл осуществляется по закону, согласованному со скоростью кристаллизации. В условиях направленного движения фронта кристаллов от обода к центру объем запрессовываемого металла в единицу времени должен составлять не менее 10 % от объема металла, закристаллизовавшегося за тот же отрезок времени. А так как условием устойчивого управления наложением давления является от-

вод теплоты перегрева и скрытой теплоты кристаллизации, то определение объема металла, закристаллизовавшегося в единицу времени, требует решения трехмерной задачи теплопроводности. Численное решение этой задачи сопряжено с определенными трудностями, которые, однако, имеют временный характер. По мере освоения высокопроизводительных процессов вычислений и обработки информации появится возможность в реальном режиме времени определять требуемое положение плунжера и количество металла, необходимое для компенсации усадки.

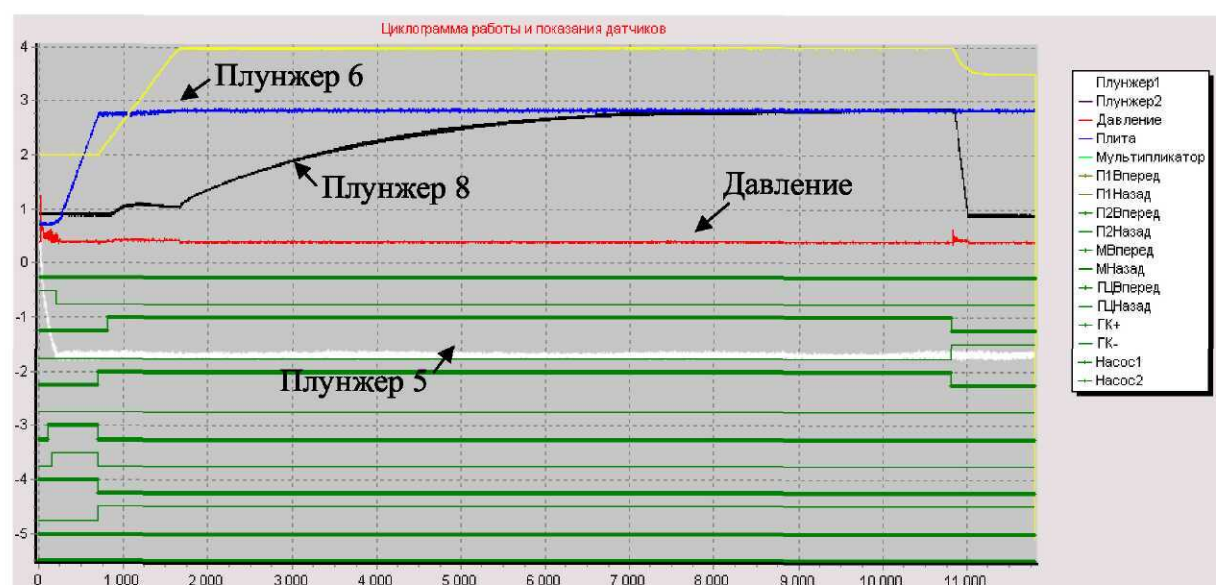


Рис. 72. Циклограмма с учетом корректировки

Разработанный прием управления наложением давления состоит в программировании частотно-импульсной модуляции давления рабочей жидкости в гидросистеме. Дело в том, что запрессовка излишнего объема связана с повышением давления на металл. Это повышение давления может вызвать кристаллизацию металла при более высокой температуре, что создает опасность преждевременной остановки плунжера, после которой за счет выделения скрытой теплоты кристаллизации произойдет расплавление отдельных объемов. Это и есть потеря устойчивости управления наложением давления. Частотно-импульсная модуляция позволяет обеспечить движение плунжера и его разгрузку, когда жидкий металл сжимается. Говоря другими словами, импульсное нагружение прессующего плунжера

создает условия, когда по мере развития усадки плунжер втягивается внутрь отливки ровно на столько, чтобы компенсировать усадку металла.

Возможен и третий вариант управления, когда скорость плунжера недостаточная. В этом случае программируется накачка давления в поршневую и в штоковую полости гидроцилиндра, а более высокая скорость движения обеспечивается за счет непрерывной подачи рабочей жидкости из гидросистемы в поршневую полость и стравливания давления в частотно-импульсном режиме из штоковой полости.

Для случая, представленного на рис. 72, наиболее приемлемым является третий вариант управления.

Выбор сплава для литых автомобильных дисков. Тот факт, что обнадеживающие результаты и требуемое качество были достигнуты при использовании сплава АЛ246, не является случайным. Сплав разработан в г. Королеве. Разработчиком является известный специалист А.А. Тихонов. Это термически упрочняемый литейный сплав в период с 1993 по 1996 гг. нами исследован на изделиях пневмоарматуры и показал высокие свойства как после изготовления отливок, так и после полигонных испытаний в течение трех лет в составе стартовых космических комплексов.

По свойствам в термически обработанном состоянии этот сплав не уступает классическим дюралюминам, что открывает реальные перспективы его использования для освоения производства легких высокопрочных и высокоточных литых автомобильных дисков.

По ценовому критерию диски из сплава АЛ246 занимают промежуточное положение между лучшими литыми из силуминов и лучшими штампованными из дюралюмина.

Литой автомобильный диск из сплава АЛ246, отвечающий высоким требованиям по качеству при сравнительно низкой стоимости, представлен на рис. 73.

На этом исследовательскую часть, связанную с созданием технологии производства литых автомобильных дисков из высокопрочных алюминиевых сплавов литьем с программным наложением давления на кристаллизующийся металл, можно считать законченной.

Этап, связанный с опытно-конструкторскими разработками, безусловно, должен быть посвящен проектированию специального оборудования и технологической оснастки, созданию адаптивной системы управления.



Рис. 73. Литой диск из сплава АЛ246

Требования к оборудованию, технологической оснастке и системе управления. Не оставляет сомнения, что оборудование для производства литых автомобильных дисков должно быть специальным; его технологические возможности необходимо привести в соответствие с режимами заполнения формы расплавом и наложения давления на кристаллизующийся металл. Принципиально горизонтальная компоновка прессы является вполне оправданной. Необходимо также сохранить конструкцию жесткого подвижного блока плит с усиленными направляющими. Радикально необходимо переработать гидросистему прессы.

Сравнение циклограмм, представленных на рис. 54 и 65, позволяет сделать вывод, что если давление на металл накладывать, например, при включенном мультипликаторе (см. рис. 54), то мультиплицирующий плунжер 8 идет медленно, в то время, как видно на рис. 65, когда гидростанция работает только на плунжер 8, время наложения давления сокращается в два-три раза.

Сравнение результатов расчета теплообмена и временных интервалов срабатывания гидроцилиндров по циклограммам (см. рис. 49, 65, 66) показывает, что между ними необходимое соответствие не достигнуто. Реаль-

ный расход рабочей жидкости в гидросистеме соответствует потребляемой мощности $N = pQ = 10 \cdot 10^6 \text{ Па/м}^2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с} = 10 \text{ кВт}$.

При такой мощности минимальное время срабатывания гидроцилиндра при заполнении расплавом полости формы не может быть меньше 8...9 с. Для создания необходимого усилия запираия перед наложением давления как минимум на 3...4 с необходимо включить мультипликатор, чтобы от момента начала заполнения до наложения давления на металл интервал времени составлял 11...13 с, когда в тонких сечениях обода металл кристаллизуется и никаким давлением осуществить его пропрессовку не представляется возможным.

Для полной и эффективной реализации принципиальной схемы процесса (см. рис. 42) необходимо заполнение формы осуществлять в течение 2,5...3 с, с задержкой 1,5...2 с после включения мультипликатора. И если мощности гидростанции для наложения давления на металл вполне достаточно, то отрезок времени до срабатывания мультипликатора с точки зрения необходимой мощности оказывается критическим. Необходим либо привод более высокой мощности, либо внешний аккумулятор энергии.

Из диаграммы требуемой мощности, представленной на рис. 74, видно, что в течение 7 с дефицит энергии равен

$$Q = \int_{\tau} N d\tau \cong 150 \text{ кДж.} \quad (54)$$

Источником данного количества энергии может служить пневматический аккумулятор, у которого $Q = p dV = 150 \text{ кДж}$. В диапазоне изменения давления 15...10 МПа объем сжатого газа должен составлять 30 дм³, при этом объем выбрасываемой в гидросистему рабочей жидкости составляет 15 дм³, что в полной мере соответствует суммарному объему задействованных гидроцилиндров, каждый из которых имеет поршень диаметром 200 мм. Габаритные размеры пневматического аккумулятора составляют Ø350x x800 мм.

В то же время наш опыт эксплуатации гидравлического мультипликатора, который работает в диапазоне давлений 10...100 МПа, показал, что разработанные конструктивные решения и применяемые материалы обеспечи-

вают безопасную и безотказную работу на протяжении более 10 лет непрерывной эксплуатации.

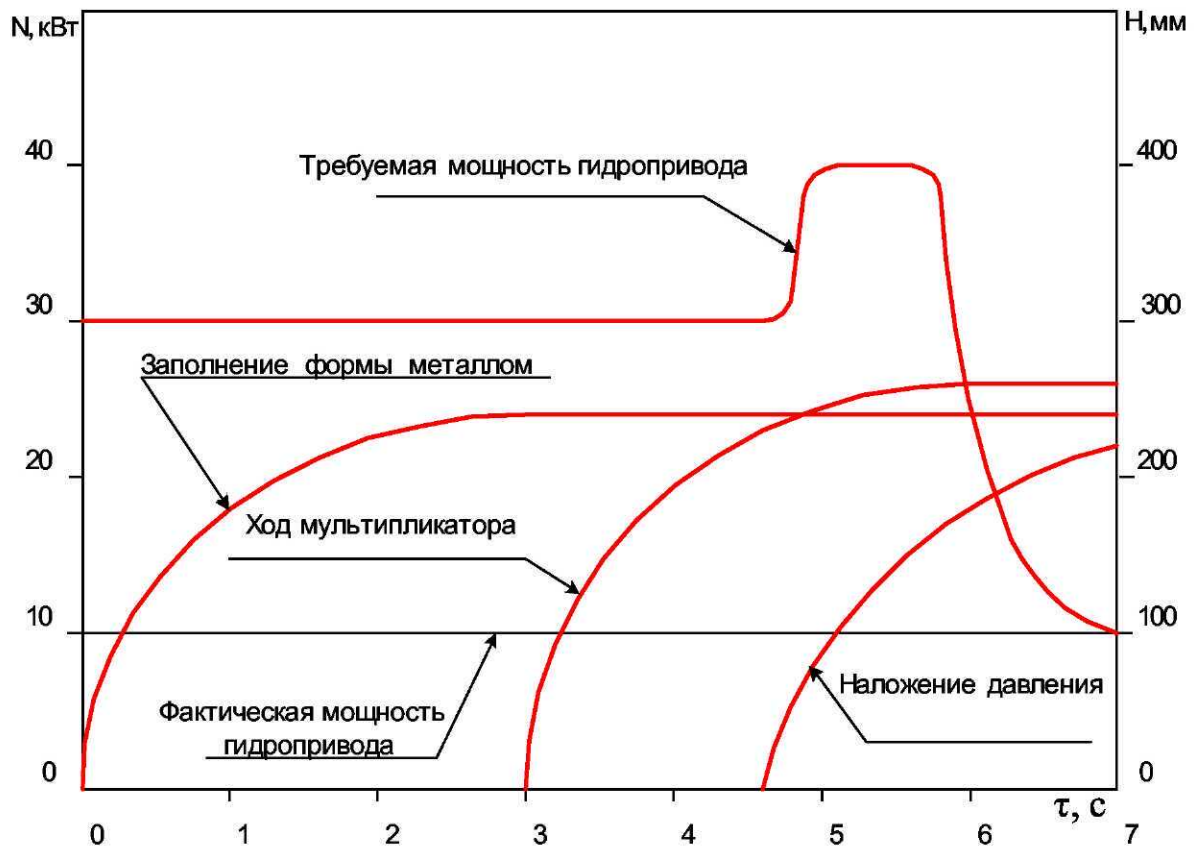


Рис. 74. Требуемые динамические характеристики и мощность гидропривода

Непосредственные измерения позволили установить, что в цеховых условиях сжимаемость рабочей жидкости подчиняется зависимости

$$\frac{dV}{dp} = KV, \quad (55)$$

где V — объем сжимаемой жидкости, K — эмпирический коэффициент, равный $\frac{7 \cdot 10^{-4}}{\text{МПа}}$. С учетом (54) $dV = \frac{Q}{p} = \frac{150}{100} \frac{\text{кДж}}{\text{МПа}} = 1,5 \text{ дм}^3$,

$$V = \frac{1}{K} \frac{dV}{dp} = \frac{1}{7 \cdot 10^{-4}} \frac{1,5}{100} = 21,4 \text{ дм}^3.$$

Во время срабатывания аккумулятора он способен выбросить в гидросистему примерно 18 дм^3 рабочей жидкости под давлением 10 МПа; габаритные размеры гидроаккумулятора $\varnothing 400 \times 900$ мм. При существующей гидрокинематической схеме для фиксации плиты вместо мультипликатора использован жесткий упор, а энергия 78,5 кДж существующего мультипликатора использована на этапах заполнения формы и наложения давления. Наличие же автономного гидроаккумулятора может существенно расширить технологические возможности при освоении новых видов продукции.

На этом основании гидравлическая схема пресса ПЛД-300 (см. рис. 24) дополнена гидроаккумулятором ГА и обратным клапаном КОЗ. Измененный вариант гидравлической системы пресса представлен на рис. 75.

Подводя итог, необходимо отметить, что разработка технологии производства литых автомобильных колес (дисков), основанная на использовании высокого давления для опрессовки кристаллизующегося металла, представляет собой сложную научно-техническую проблему, связанную с комплексным решением следующих задач:

- выбор оборудования для осуществления технологических операций;
- создание оснастки, обеспечивающей заполнение формы и наложение давления на кристаллизующийся металл;
- создание автоматизированной контрольно-измерительной системы;
- создание автоматизированной системы управления сбором, преобразованием и представлением информации о технологическом процессе;
- теоретическое обоснование и выбор гидродинамических режимов заполнения формы металлом, а также режимов теплового воздействия жидкого металла с материалом формы.

Одним из наиболее важных результатов выполненной работы следует считать создание системы управления процессом, способной формировать знания о разрабатываемом процессе, улучшать и совершенствовать качество продукции. Разработанная система универсальна и может быть использована при освоении производства других видов продукции.

Вместе с тем следует также отметить ряд позиций, по которым разработанные решения оказались недостаточно эффективными. Это, прежде всего, резьбовой затвор формы, сборка и разборка которого представляют собой трудоемкий немеханизированный процесс. Недостаточная мощность

пресса в целом и низкие динамические характеристики отдельных исполнительных механизмов. Недостаточная величина хода подвижной плиты и связанная с ней неоправданно большая масса пресс-остатка.

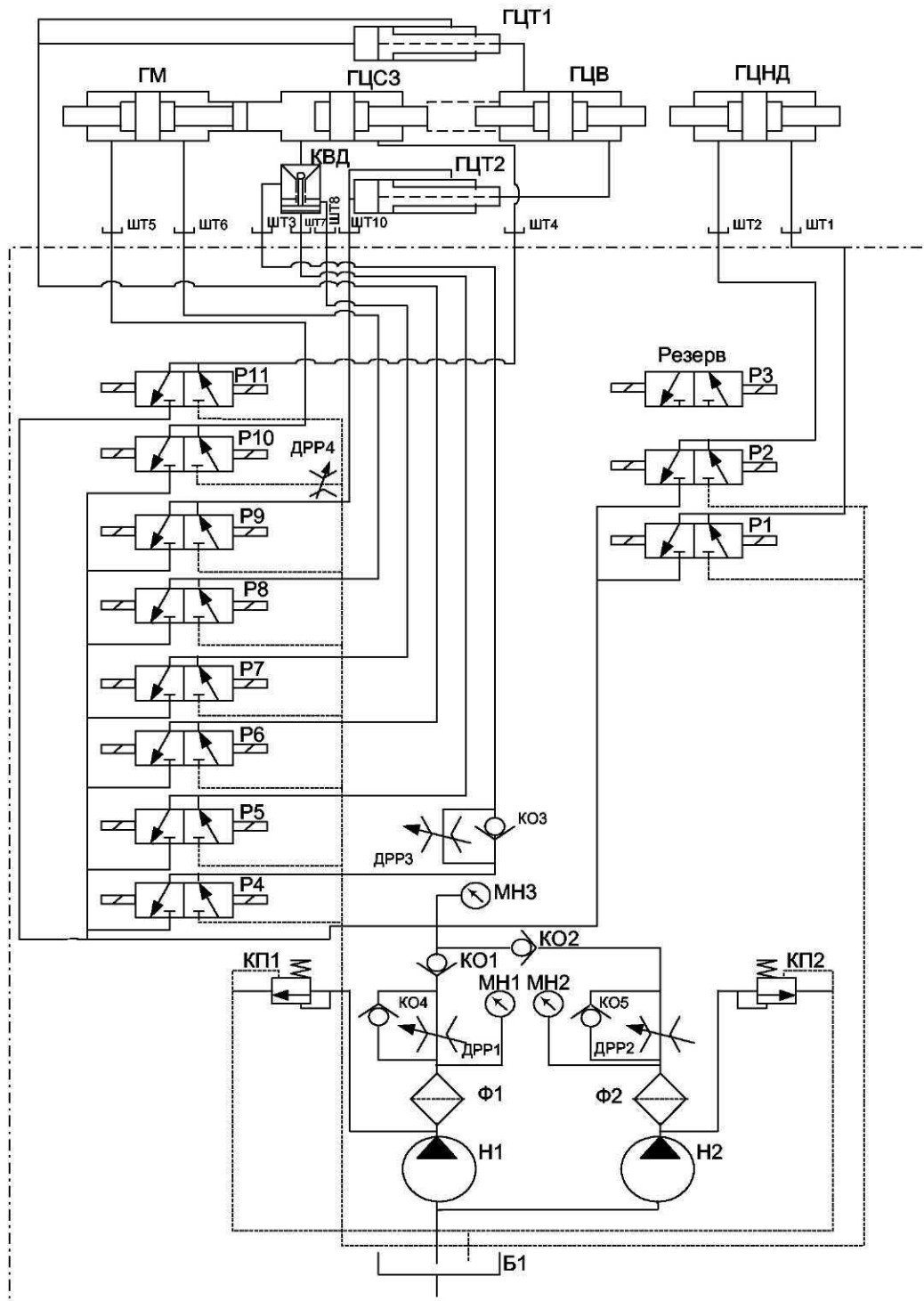


Рис. 75. Гидравлическая система пресса со встроенным гидравлическим аккумулятором

Факт получения годных без литейных дефектов отливок можно расценивать как окончание поисковых исследований и начало опытно-конструкторских и внедренческих разработок.

На следующем этапе освоения серийного производства предстоит провести реконструкцию и доработку оборудования и технологической оснастки таким образом, чтобы исключить потери основного технологического времени, обеспечить постоянство значений параметров процесса.

Глава 5. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА В КОНЦЕПЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ОТКРЫТЫХ СИСТЕМ

5.1. Создание информационной среды

Производство материальных объектов и сопутствующие ему процессы проектирования, технологической подготовки и управления так сильно отличаются от других видов деятельности человека, что им должна отвечать особая архитектура программно-методического, математического и информационного обеспечения.

Принципиальная разница между обработкой информации в информационно-аналитических системах управления (ИАСУ) и в других применениях вычислительной техники в основном сводится к двум положениям.

1. Производство и все процессы в нем принадлежат физическому миру, а процессы, протекающие в компьютере, – миру информации. Следовательно, необходимо преобразование производственных проблем в информационные, а также обратное преобразование из мира информации в физический мир. По сути, это проблема адекватного моделирования, т.е. установления соответствия (по возможности взаимно однозначного) между физическим и информационным пространствами. При создании традиционного математического обеспечения (МО) для решения вычислительных задач в центр разработки ставится единственная математическая модель проблемы, которая через прикладной интерфейс адаптируется к различным областям применения (рис. 76). Такой подход к решению производственных задач практически не реализуем, поскольку единая модель, описывающая все производственные проблемы, не может быть создана ввиду их сложности и многообразия.

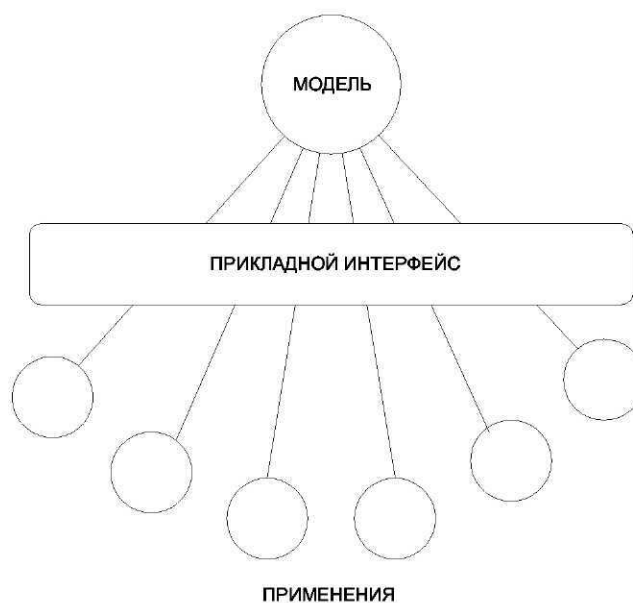


Рис. 76. Вариант решения производственных задач

2. Традиционный подход, основанный на рис. 76, удовлетворительно используется при расчетах, поиске информации, количественной или логической обработке данных и т.д. Однако при проектировании и разработке технологий, когда приходится генерировать и обрабатывать множество сведений о том, как проектировать и как производить такой подход и основанное на нем МО, оказываются неудовлетворительными. В связи с этим предлагается отбросить стратегию единственной модели и перейти к стратегии, сущность которой показана на рис. 77. Здесь роль ядра системы играет не модель, а *общая (интегрированная) база данных (ОБД)*, к которой могут обращаться различные проблемно-ориентированные модели.

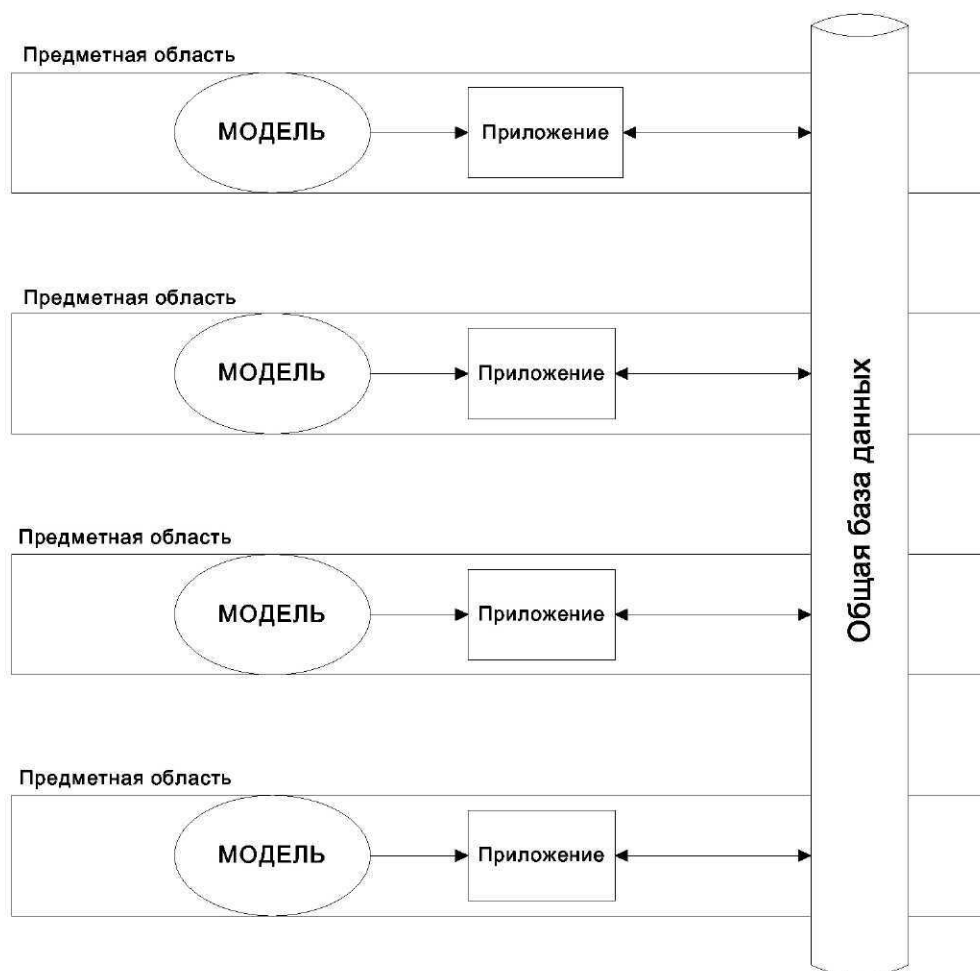


Рис. 77. Вариант решения производственных задач

Предполагается, что в ОБД хранятся информационные объекты (ИО), адекватно отображающие в информационный мир сущности физического мира: предметы, материалы, изделия, процессы и технологии обработки,

разнообразные документы, финансовые ресурсы, персонал и подразделения предприятия, оборудование и т.д. Модели, описывающие конкретные применения в проблемных областях, обращаются в ОБД, находят в ней необходимые ИО, обрабатывают их и помещают в ОБД результаты этой обработки. В данном случае все, что происходит в информационном мире, рассматривается на основе дуализма «объект – операция».

Дальнейшее развитие информационных технологий привело к появлению объективно-ориентированного программирования, которое позволило адекватно перевести многие процессы, протекающие на предприятии, в виртуальное информационное пространство, что и сделало актуальной всю проблематику, связанную с использованием *CALS*-технологий. Сказанное относится, в частности, к процессам конструкторской и технологической подготовки производства, в ходе которых создается техническая документация различных видов и назначений, а также к процессам управления на всех уровнях, когда по необходимости приходится иметь дело с большими объемами разнообразной информации. Сегодня эти процессы в значительной мере состоят из операций создания, преобразования, транспортировки и хранения информационных объектов в рамках единого информационного пространства.

Современная информационная инфраструктура (ИИ) состоит из информационных и вычислительных ресурсов, объединяемых цифровыми средствами телекоммуникаций, представляет собой гетерогенную среду, построенную на разнородных платформах – от персональных компьютеров до супер-ЭВМ и использующих различные операционные системы. В такой среде неизбежно возникает проблема совместимости входящих в среду компонентов.

В настоящее время общепризнанно, что информационная инфраструктура любого уровня – отраслевая, производственная, образовательная и т.д. должна в качестве интеграционной основы использовать принципы открытых систем. Существо принципов открытых систем состоит в обеспечении совместимости всех используемых программно-аппаратных компонентов за счет применения согласованного набора стандартов. Этот набор стандартов принято называть профилем.

Для реализации принципов открытых систем необходим определенный механизм, в первую очередь технология, включающая ряд последователь-

ных этапов и процедур, предполагающая проведение организационно-методических мероприятий, основанных на определенных методах и средствах.

Технология открытых систем применима к системам всех классов и назначений – от микропроцессорных встраиваемых систем до распределенных систем, включающих супер-ЭВМ, получивших название *Grid*-архитектуры, и представляет собой своего рода метатехнологию.

В обобщенном виде ИИ любого уровня можно представить в форме сферического ресурса, содержащего «ядро» и «оболочку». Ядро ресурса может быть разным (программно-аппаратная платформа, шина и т.д.), но для обеспечения открытости, т.е. взаимодействия различных видов ресурсов между собой оболочка должна состоять из стандартных интерфейсов, а в телекоммуникациях должны использоваться стандартные протоколы.

Чем разнороднее среда, чем выше уровень ее гетерогенности, тем острее стоит проблема обеспечения ее открытости. Высокий уровень гетерогенности особенно характерен для инновационных разработок, так как в условиях перехода к информационному обществу страны с развитой рыночной экономикой будут располагать заметными преимуществами в завоевании новых рынков сбыта и обеспечении конкурентоспособности продукции.

Важным аспектом в создании ИИ является возможность проведения экспериментальных исследований и создания адаптивных систем управления, использующих экспериментальную информацию для коррекции управляющих воздействий в реальном режиме времени.

5.2. Технология открытых систем (ТОС)

Возможны два случая создания ТОС:

- создается новая система;
- модернизируется существующая система.

Второй случай более распространен, причем характерной является проблема несовместимости отдельных подсистем.

Разработка ТОС включает этапы:

- выбор модели среды открытой системы;
- построение профиля;

- составление спецификаций и комплектация соответствующих программных и аппаратных средств;
- разработка приложений;
- аттестационное тестирование.

Выбор модели

На этом этапе выбирается одна из модификаций эталонной модели открытой среды системы в зависимости от ее архитектуры.

Как видно из рис. 78, эталонная модель является трехмерной. По вертикали в ней можно выделить следующие компоненты:

- приложение;
- платформу;
- внешнюю среду;
- интерфейс приложения с платформой;
- интерфейс платформы с внешней средой.

По горизонтали представлены компоненты:

- службы операционной системы;
- службы интерфейса «человек – машина»;
- службы управления данными;
- службы обмена информацией;
- службы машинной графики;
- службы сетевого обеспечения.

В третьем измерении приведены:

- службы поддержки разработки программного обеспечения;
- службы защиты информации;
- интернационализация;
- службы поддержки распределенной системы.

Следует заметить, что сеть *INTERNET*, построенная на основе протоколов *TCP/IP*, также является составной частью открытой системы.

Построение профилей

При построении профилей используется метод последовательной декомпозиции, начиная от области применения профиля и кончая выбором необходимых стандартов. Соответственно процесс построения профиля разделяется на несколько этапов (рис. 79):

- этап анализа предметной области, на нем выявляются отдельные направления деятельности (НД), которые должны быть учтены в профиле;



Рис. 78. Эталонная модель среды открытых систем

– этап формулирования требований; здесь выявляются требования, предъявляемые пользователем к функциональным возможностям и качеству производственных, технологических и других служб, обеспечивающих каждое из НД, определяются информационные службы (ИС), которые их поддерживают, строится каталог из ИС и уточняются требования к ним;



Рис. 79. Этапы построения профиля

– этап логического проектирования, на котором выявляются информационные технологии (ИТ), необходимые для поддержания служб ИС, описываются технологическая структура и вычислительная среда соответствующей открытой системы, строятся модели технологических компонентов и общие модели служб ИТ;

– этап физического проектирования, на котором обобщенные модели служб ИТ и технологические компоненты заполняются стандартами, при этом определяются все опции базовых стандартов, а для принятия решения о применимости стандартов используются установленные ранее показатели качества.

Составление спецификаций и комплектация программных и аппаратных средств

На этом этапе в соответствии со стандартами, вошедшими в профиль, составляется спецификация (закупочная ведомость) и осуществляется закупка готовых изделий. В мировой практике имеется термин – *Commercial of the shelves products*. При этом должен существовать каталог этих продуктов.

Разработка приложений

Практически при создании любой системы необходимо разработать новые прикладные программы, которые также должны соответствовать профилю.

Тестирование

Заключительным этапом при проектировании открытой системы выступает этап сертификационного тестирования. Тестирование проводится на соответствие стандартам, входящим в профиль.

Обобщенная схема ТОС представлена на рис. 80, из которой, в частности, видно, что все этапы выполняются с использованием *Web*–системы информационной поддержки [120].

5.3. Создание интегрированной системы проектирования, отработки технологии и программного управления

Из вышесказанного видно, что на современном этапе автоматизация технологических процессов предполагает целый комплекс мероприятий, направленных на информационное обеспечение всех этапов производства – от постановки задач до реализации готовой продукции. Использование единого информационного пространства может дать эффект только при условии комплексной автоматизации процессов сбора, хранения и использо-



Рис. 80. Технология открытых систем

вания информации, которая, как следует из Концепции ТОС, должна быть представлена исключительно в электронном виде с возможностью быстрого поиска, исключая потерю данных, несанкционированный доступ и т.д.

Конкурентоспособность продукции, изготавливаемой с использованием давления, накладываемого на кристаллизующийся металл, как и других видов продукции, зависит от длительности и трудоемкости этапа подготовки производства. Особенность процесса, как видно из предыдущих глав, состоит в том, что на всех этапах формирования отливки для обоснования закона наложения давления необходимо знать положение фронта кристаллизации. Эта задача может быть решена расчетно-аналитическим или экспериментальным путем. Соответствующий программный модуль до настоящего времени не разработан, поэтому речь может идти о создании такой конфигурации системы, которая могла быть использована и для решения практических задач, например при отработке технологии, и в то же время ее возможности в плане дальнейшего изучения и совершенствования процесса можно было наращивать и усиливать.

Как следует из схемы, представленной на рис. 81, на разных этапах подготовки производства используются следующие основные подсистемы:

– «КОМПАС–3D», который предназначен для создания трехмерных ассоциативных моделей отдельных деталей и сборочных единиц. Позволяет реализовать классический процесс трехмерного параметрического моделирования – от идеи к ассоциативной объемной модели, от модели к конструкторской документации. Моделирование изделий в «КОМПАС–3D» можно вести различными способами: «снизу вверх» (используя готовые компоненты), «сверху вниз» (проектируя компоненты в контексте конструкции), опираясь на компоновочный эскиз (например, кинематическую схему) либо смешанным способом. «КОМПАС–3D» содержит систему трехмерного моделирования, чертежно-графический редактор и модуль проектирования спецификаций. Подсистема обладает достаточным функционалом для работы над проектами, включающими несколько тысяч подборок, деталей и стандартных изделий. Она поддерживает все возможности трехмерного моделирования, ставшие стандартом для САПР среднего уровня.

– подсистема «КОМПАС–АВТОПРОЕКТ» – это программный комплекс автоматизации технологической подготовки производства. Предназначен для автоматизированного проектирования технологических процес-

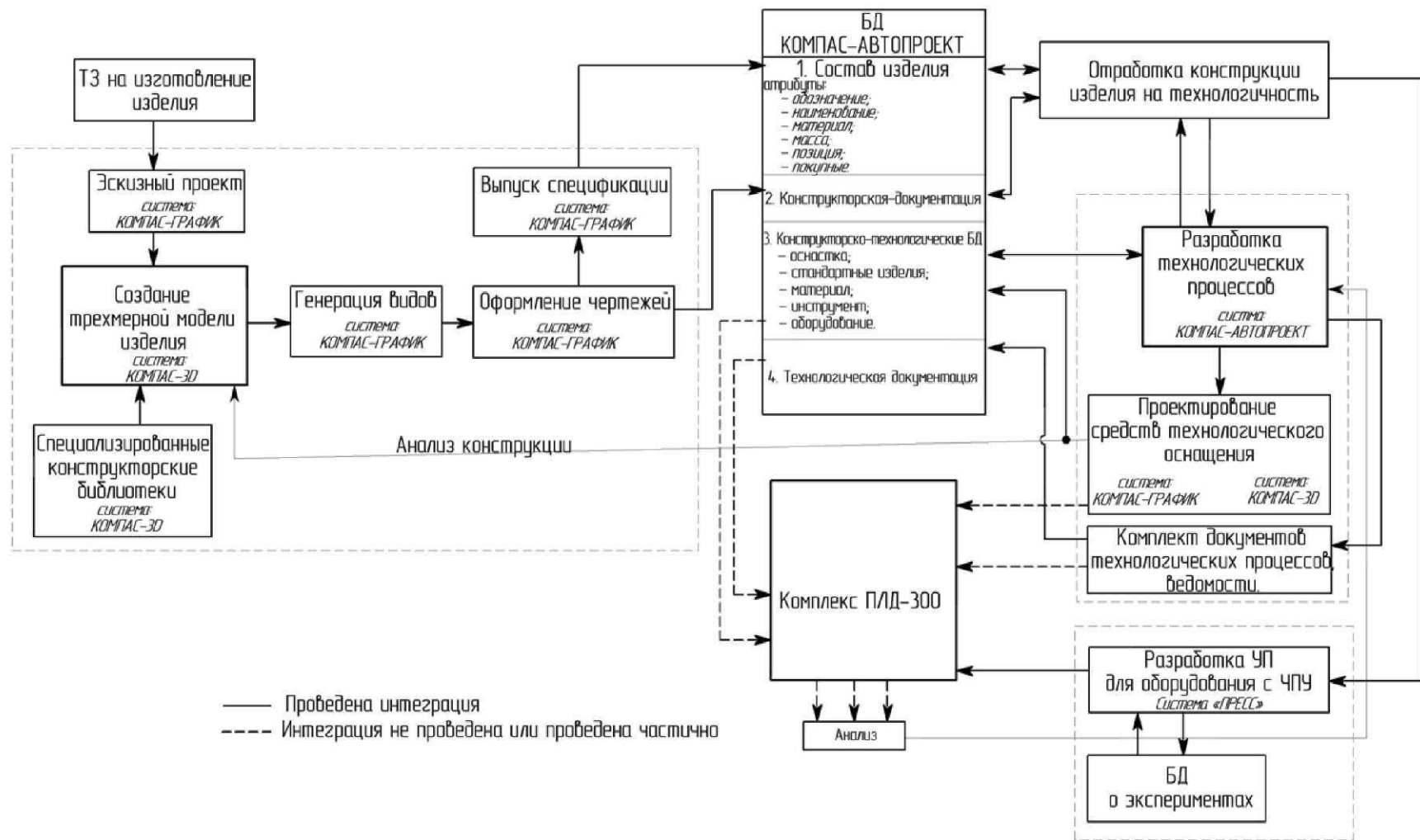


Рис. 81. Схема взаимодействия основных подсистем

сов. Подсистема состоит из двух модулей: Автопроект – КТС (конструкторско-технологические спецификации) и Автопроект – Технология.

Подсистема «КОМПАС – АВТОПРОЕКТ – Спецификация» обеспечивает:

- ведение базы данных конструкторско-технологической спецификации;
- архивацию разработанных технологических процессов;
- возможность глобального анализа архивных технологий с формированием сводных технологических отчетов в формате *MS Excel*;
- импорт спецификаций из «КОМПАС – ГРАФИК».

Подсистема «КОМПАС – АВТОПРОЕКТ – Технология» обеспечивает:

- автоматизированное проектирование технологических процессов основных видов производств;
- автоматическое формирование стандартного комплекта ТД и документов произвольной формы в формате *MS Excel*;
- интеграцию с «КОМПАС – ГРАФИК»;
- возможность разработки пользователем подсистем проектирования технологи для различных видов производств.

«КОМПАС – АВТОПРОЕКТ» позволяет существенно расширить возможности системы без участия разработчиков. В подсистему встроен универсальный механизм формирования технологических ведомостей. Он основан на хранимых процедурах *SQL*-сервера, функции ядра системы и настраиваемых формах документов в формате *MS Excel*.

Подсистема «ПРЕСС» является *CAM*-системой и позволяет управлять технологическим оборудованием, создавать управляющую программу.

5.4. Автоматизированное проектирование процесса производства изделия «гильза»

Работа с *Заказчиком* складывается по следующей схеме. Создается приближенный проект по изготовлению отливки с требуемыми свойствами, в котором представлены: принципиальная схема процесса, приближенная *3D*-модель отливки, приближенная *3D*-модель оснастки. Данные в виде каталога отсылаются по электронной почте к *Заказчику*. Оперативность и наглядность позволяет прийти к быстрому согласию сторон и начать работу. Конструкция отливок в значительной степени предопределяет выбор технологического оборудования.

Трехмерное моделирование в «КОМПАС–3D» позволяет создать модель отливки и получить необходимые данные для дальнейшего расчета:

- габаритные размеры;
- массу;
- плоскость разъема формы.

Пример 3D–модели отливки «Гильза» показан на рис. 82. Функциональные возможности системы позволяют создавать и более сложные по геометрии модели отливок (см. рис. 41).

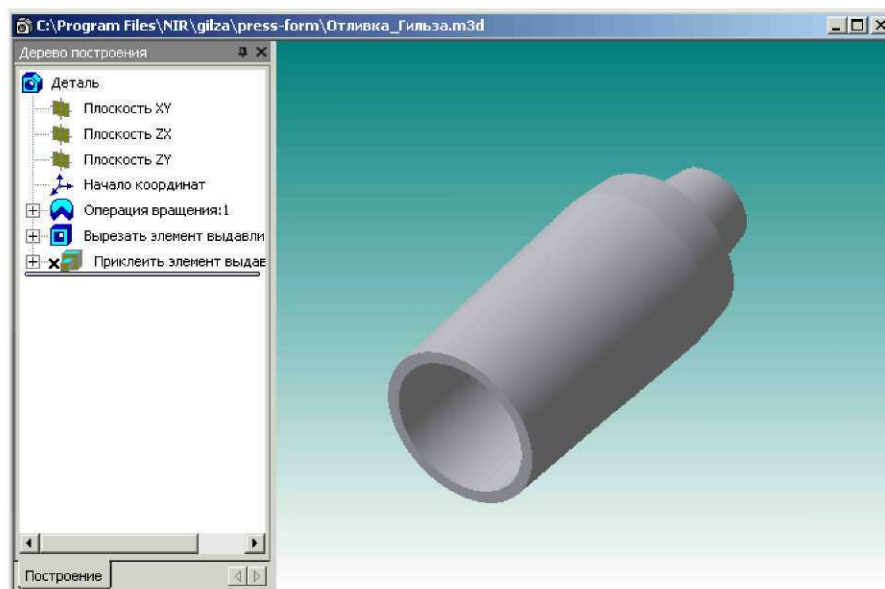


Рис. 82. Пример создания 3D-модели отливки «Гильза» в подсистеме «КОМПАС–3D»

Подсистема «КОМПАС–3D» имеет конвертеры для обмена данными с другими системами проектирования, инженерных расчетов, подготовки управляющих программ. К функциям импорта и экспорта относятся:

- чтение графических файлов форматов *DXF*, *DWG* и *IGES*;
- запись файлов 3D-моделей форматов *IGES*, *SAT*, *XT*, *STEP*, *VRML* и *STL*.

Данная функция позволяет конвертировать в *CAE*–системы специальные модули для дальнейших аналитических расчетов.

Принципиальная схема процесса

По полученным данным отливки проектируется принципиальная схема процесса. Проектирование ведется в «КОМПАС – ГРАФИК–2D». Плоское проектирование оптимально подходит для этих целей. На данном этапе ре-

шаются вопросы подвода металла в полость формы, отвод газов и т.п., осуществляется компоновка основных узлов оснастки (стержней, плунжеров, поршней и т.д.). При этом рассматриваются варианты схем с вносимыми изменениями. Средства чертежного редактора «КОМПАС – ГРАФИК» позволяют в кратчайшие сроки создать конструкторские документы благодаря таким функциональным возможностям системы, как продуманный интерфейс, многодокументный режим работы с чертежами, разнообразные способы и режимы построения примитивов, создание библиотек и типовых фрагментов.

Пример схемы процесса изготовления отливки «гильза» приведен на рис. 83. Для реализации предложенной схемы необходимо спроектировать и изготовить технологическую оснастку, выбрать соответствующее оборудование, выполнить экспериментальные и теоретические исследования.

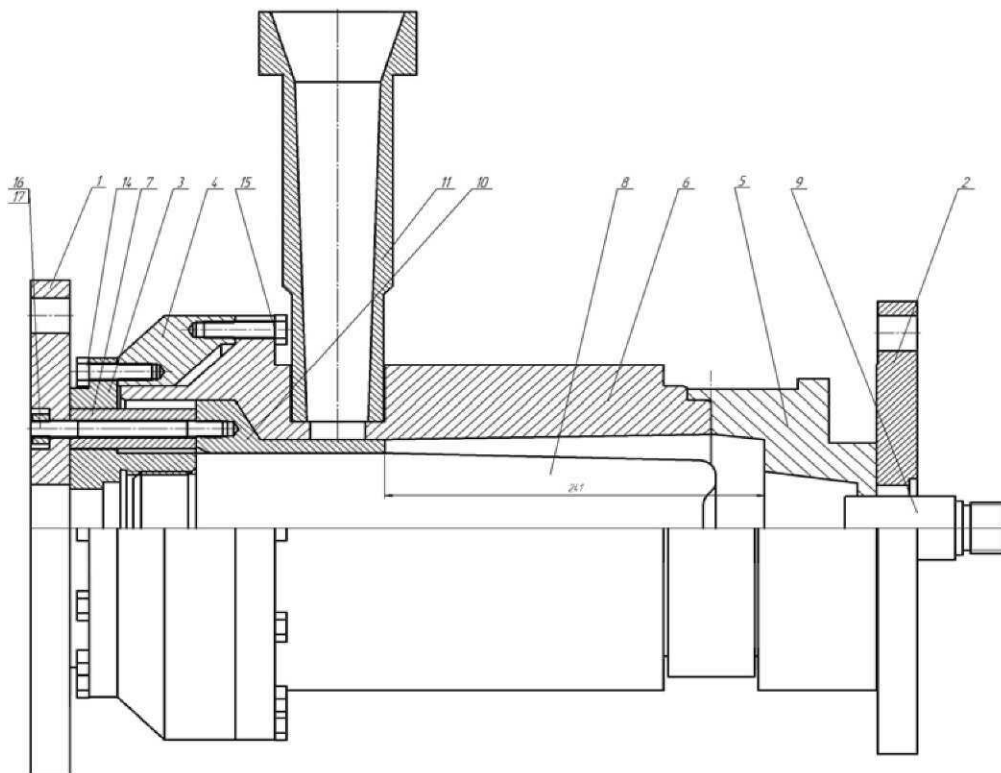


Рис. 83. Пример принципиальной схемы процесса изготовления отливки «гильза», выполненной в «КОМПАС – ГРАФИК – 2D»

Проектирование технологической оснастки и выбор оборудования

Такие этапы разработки процесса, как обоснование принципиальной схемы, проектирование оснастки и выбор оборудования требуют принятия согласованных системных решений.

Целью исследований является повышение качества отливок, приближение их свойств к свойствам кованных и штампованных заготовок на основе изучения и анализа технологических режимов литья с наложением давления.

Для согласования параметров технологической оснастки и соответствующего оборудования разработана трехмерная модель пресса ПЛД-300 (рис. 84), которая составлена по двумерным моделям-чертежам, отдельных деталей. Разработанная 3D модель используется как информационная база для пространственного и моделирования и поиска новых конструктивных решений. Это основное назначение модели. В то же время данная модель может быть использована для подготовки конструкторской документации и информационного сопровождения в автоматическом режиме.

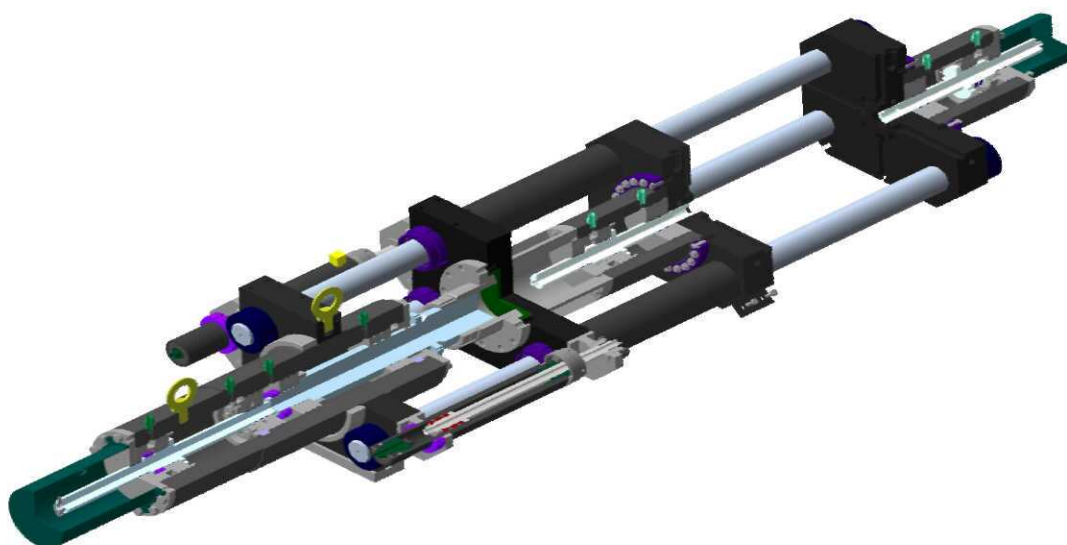


Рис. 84. 3D-модель пресса ПЛД-300

При проектировании оснастки (рис. 85) были задействованы следующие возможности «КОМПАС – 3D»:

- булевы операции над типовыми формообразующими элементами;
- ассоциативное задание параметров элементов;
- построение вспомогательных прямых и плоскостей, эскизов, пространственных кривых;

- создание конструктивных элементов – фасок, скруглений, отверстий, ребер жесткости, тонкостенных оболочек;
- специальные возможности, облегчающие построение литейных форм – литейные уклоны, линии разъема, полости по форме детали;
- создание массивов формообразующих элементов и компонентов сборки;
- вставка в модель стандартных изделий из библиотеки;
- моделирование компонентов в контексте сборки;
- наложение сопряжений на компонент сборки;
- обнаружение взаимопроникновения деталей и сборки;
- переопределение параметров любого элемента на любом этапе проектирования, вызывающее перестроение всей модели.

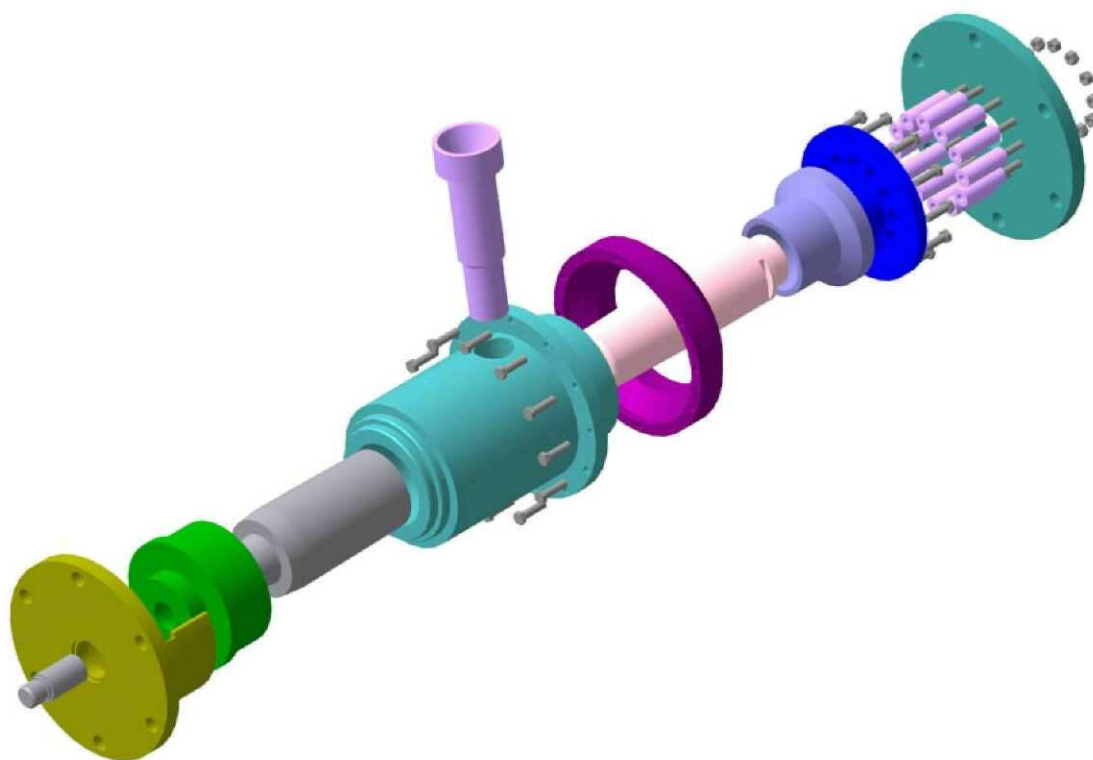


Рис. 85. 3D–модель пресс-формы в разнесенном виде для отливки «гильза»

По созданной 3D–модели создается конструкторская документация в формате 2D, ассоциативно связанная с ранее созданной моделью (рис. 86). При внесении изменений в конструкцию модели автоматически перестраи-

ваются и чертежи. Данная интеграция во многом сокращает сроки подготовки КД. К достоинствам можно прибавить наглядность конструкции и возможность манипулирования взаимозаменяемыми узлами и деталями в конструкции.

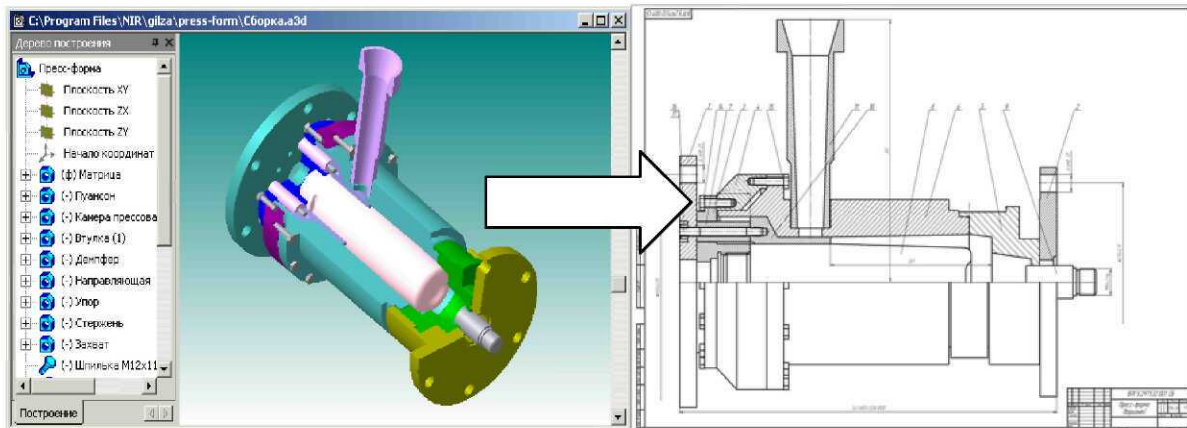


Рис. 86. Интеграция 3D-модели сборки пресс-формы в сборе в 2D-чертеж

Весь состав изделия оборудования и оснастки заносится в БД подсистемы «КОМПАС – АВТОПРОЕКТ – Спецификации». Здесь же заполняются данные об отливках, на технологические процессы которых имеются ссылки. Пример окна подсистемы «КОМПАС – АВТОПРОЕКТ – Спецификация» с данными о пресс-форме на отливку «гильза» представлен на рис. 87.

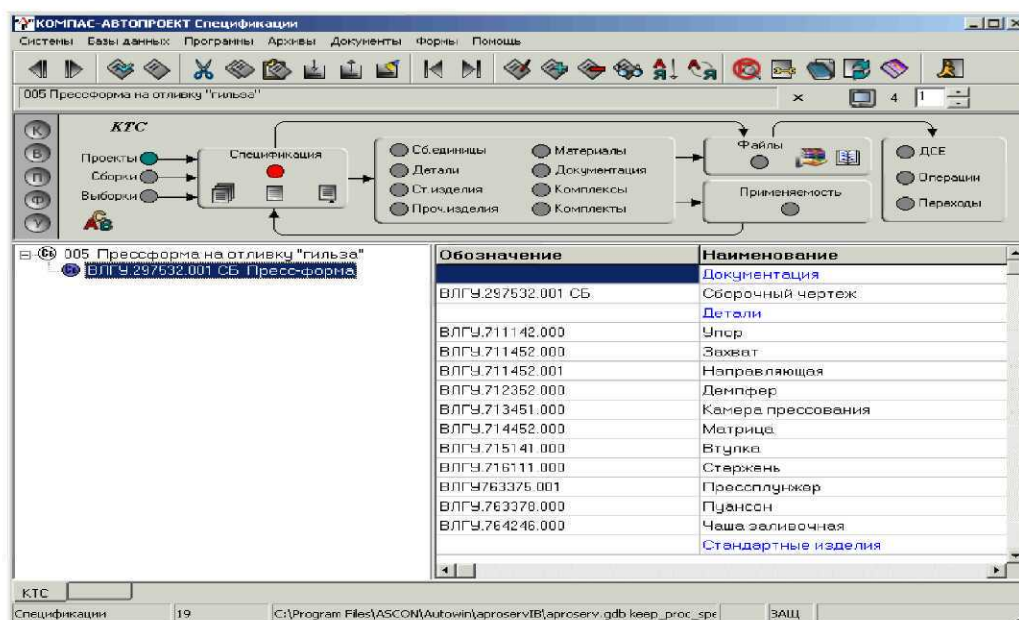


Рис. 87. Окно подсистемы «КОМПАС – АВТОПРОЕКТ – Спецификации»

На рис. 88 показано окно программы, где отображены ссылки на документы (3D-модель сборки и чертеж), относящиеся к пресс-форме в сборе. На данном уровне системы заложены возможности оперативного просмотра документов и их редактирование. Кроме файлов КОМПАС функционал подсистемы «КОМПАС – АВТОПРОЕКТ» позволит подключить файлы любых программных продуктов в рамках среды системы *Windows*. Клиент-серверная установка подсистемы «КОМПАС – АВТОПРОЕКТ» позволит работать в параллельном режиме группе пользователей с единой БД. Вход в систему имеет защитный пароль, который назначается для каждого пользователя администратором системы. Модуль снабжен многокритериальным поиском данных, что обеспечивает оперативный поиск информации.

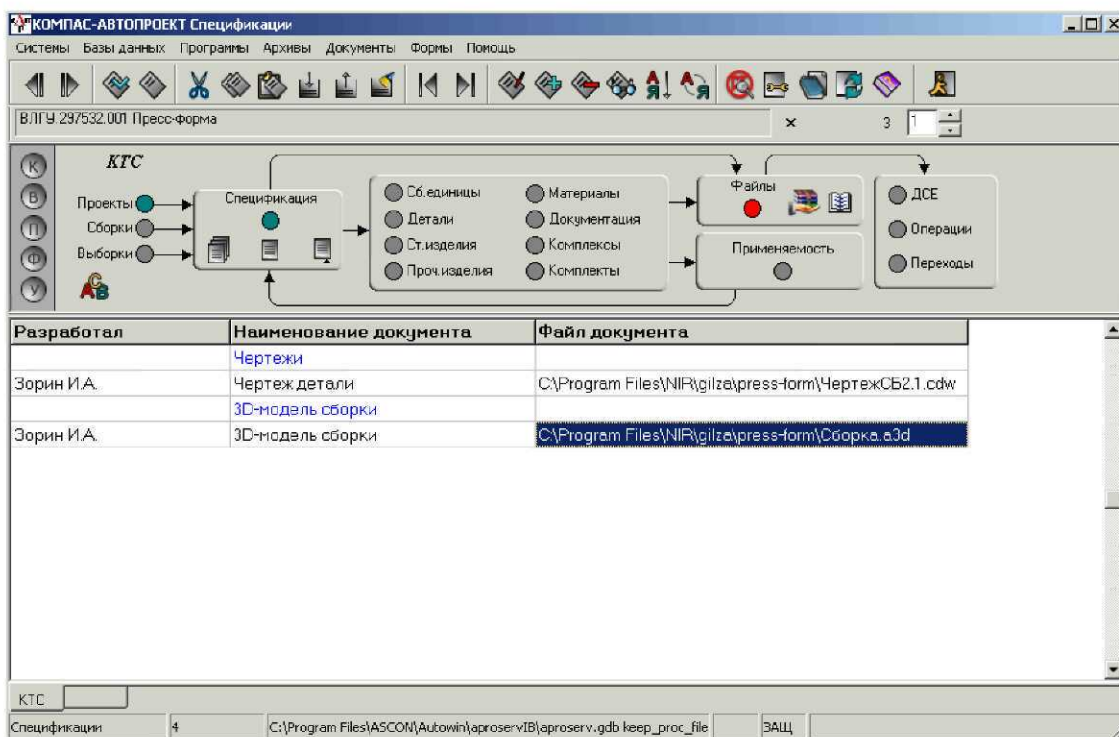


Рис. 88. Окно программы

Для удобства и наглядности при разработке управляющей программы создана программная технологическая карта (рис. 89), в которой, в частности, показано состояние клапанов в гидросистеме в циклах программы.

ЦИКЛ	M+	M-	П1+	П1-	ГЦ+	ГЦ-	П2+	П2-	ГК+	ГК-	Н1+	Н1-
Перекрытие заливочного отверстия в камере прессования подвижной плитой	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1
Плита вперед ускоренно	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1
Закрытие пресс-формы с мультипликатором	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1
Опрессовка металла плунжером №2 в полости отливки	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1
Сброс усилия на закрытие прессформы	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1
Опрессовка металла плунжером №1 в полости отливки	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1
Одновременный отвод плунжера №1 и подвижной плиты	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1
Одновременный отвод плунжера №2 и подвижной плиты	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1
Раскрытие пресс-формы (отвод подвижно плиты)	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1

Рис. 89. Программная технологическая карта

Создана структура БД управляющих программ, которая позволяет осуществлять организованное хранение использованных программ в предыдущих экспериментах. БД имеет трехуровневую структуру. На первом уровне заносятся обозначение и наименование отливок, изготовленных в ходе эксперимента (рис. 90). Кроме наименования и обозначения к каждой отливке прикрепляется ее изображение. На втором уровне заносится информация по экспериментам (рис. 91). К каждому номеру эксперимента прикрепляется полученная циклограмма в виде растрового изображения. На третьем уровне располагается непосредственно программа (рис. 92). Подобная организация позволяет:

- обеспечить хранение управляющих программ;
- проводить удобный анализ процессов;
- основываясь на данных анализа, создавать новые управляющие программы.

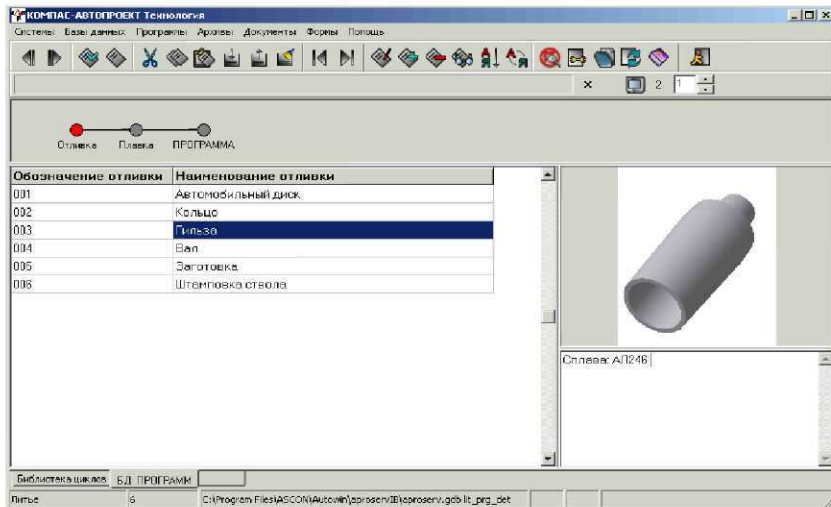


Рис. 90. Первый уровень БД

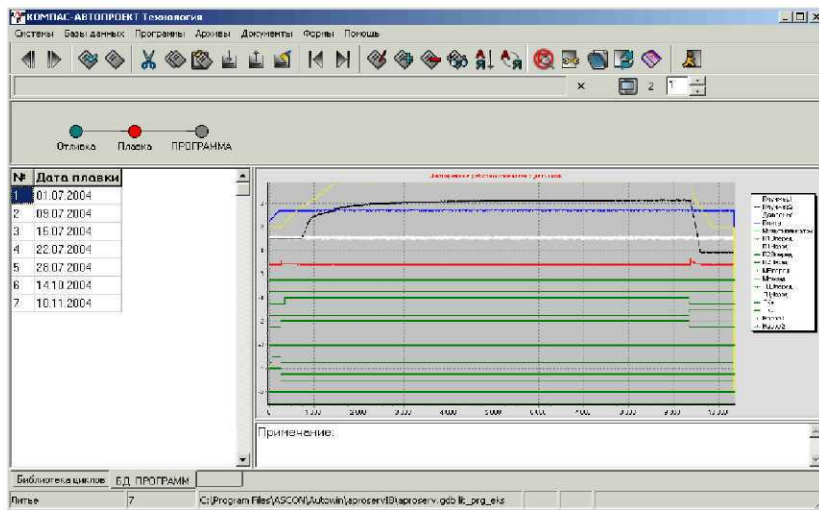


Рис. 91. Информация по экспериментам

ЦИКЛ	Время цикла	М+	М-	П1+	П1-	ГЦ+	ГЦ-	П2+	П2-	ГК+	ГК-
Перекрытие заливочного отверстия в камере прессования подвижной плитой	500	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Плита вперед ускоренно	2000	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Закрытие пресс-формы	1000	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Опрессовка металла пл. №2 в полости отливки	90000	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0
Сброс усилия на закрытие пресс-формы	10000	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0

Рис. 92. Управляющая программа

Наличие указанных БД используется при разработке новых технологических процессов (рис. 93). Для более наглядного описания процесса имеется возможность подкреплять каждую операцию фотографией, полученной в ходе эксперимента (плавки).

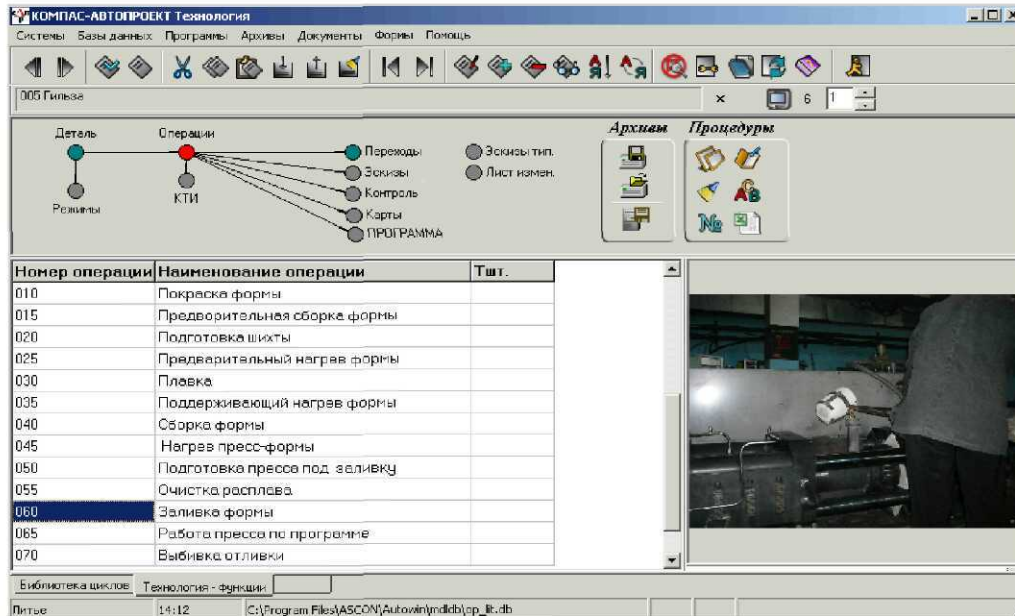


Рис. 93. Разработка нового технологического процесса

По окончании проектирования технологии и её утверждения автоматически формируется комплект ТД в формате *MS Excel*.

Пример формирования комплекта ТД представлен на рис. 94.

В настоящее время идет разработка соответствующих форм, характеризующих режимы ТП и данные об управляющей программе.

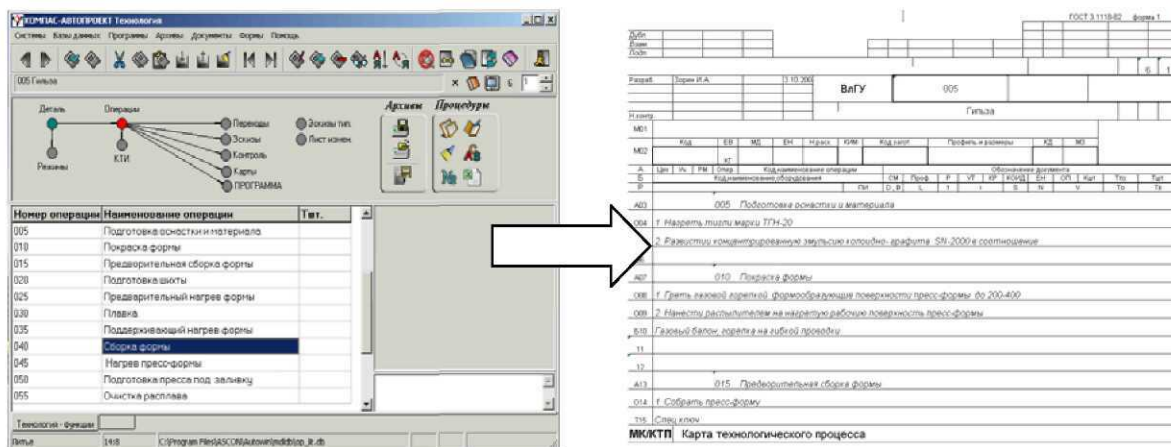


Рис. 94. Формирование комплекта ТД

Разработка системы управления

Для изучения физических закономерностей поведения расплавленного металла под влиянием высокого давления создана система сбора и обработки информации, принятия на ее основе решений об изменении условий эксперимента. Главное окно модуля управления показано на рис. 95. Функциональная схема комплекса приведена на рис. 96.

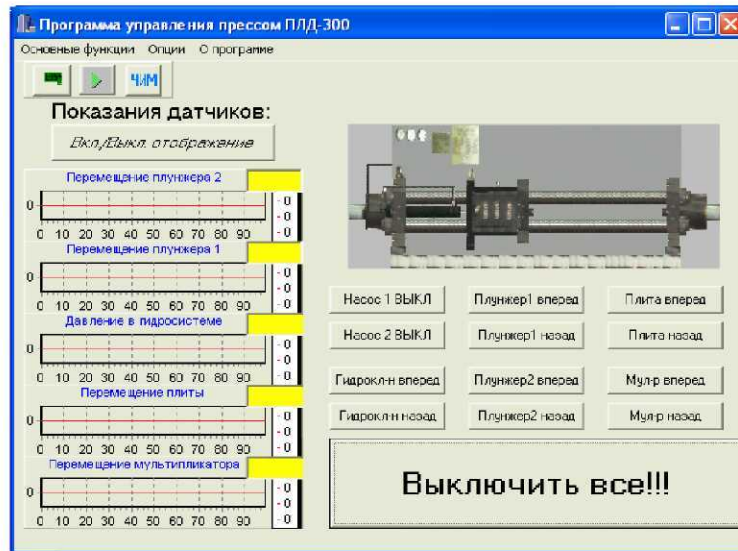


Рис. 95. Главное окно модуля управления

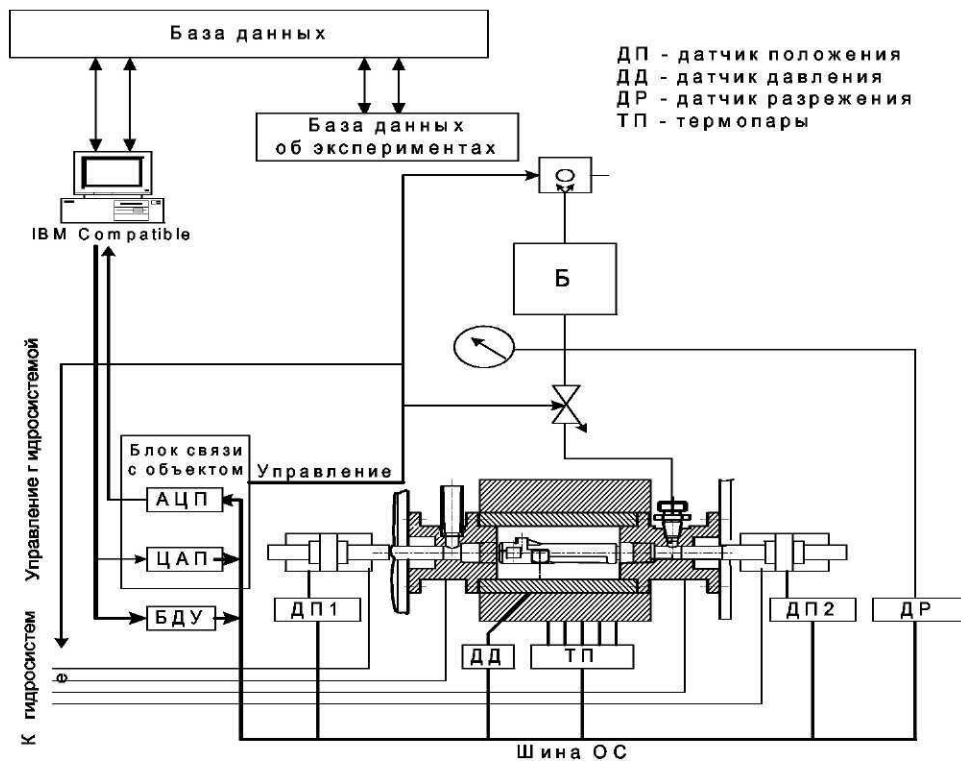


Рис. 96. Функциональная схема технологического комплекса

Система управления обеспечивает:

- управление комплексом как по гибкой, так и жесткой программе;
- выбор оборудования или привода, используемых в эксперименте, например, контрпунжер при литье с двухсторонним сжатием, вакуумное оборудование при литье с вакуумированием;
- использование данных и настроек предыдущих экспериментов благодаря тому, что настройки и данные каждого эксперимента сохраняются на жестком диске;
- конвертировать данные для дальнейшей их передачи и обработки, а также их распечатку;
- осуществлять тарировку датчиков.

Практическое использование разработанной системы позволило в сжатые сроки пройти этапы проектирования процесса и технологической оснастки, по результатам обработки 4 – 5 циклограмм (см. рис. 91) выйти на параметры процесса, обеспечивающие получение отливок без литейных дефектов. По плотности, герметичности, прочностным и пластическим свойствам полученная заготовка отвечает требованиям, предъявляемым к заготовкам, получаемым с применением методов пластического деформирования металлов. Процесс разработан как альтернатива изотермической штамповке, основанной на явлении сверхпластичности. Существенным преимуществом литья с наложением давления по сравнению с изотермической штамповкой является отсутствие внутренних напряжений, которые формируются на субмикроскопическом уровне в процессе пластического течения металла. Наложение давления во время кристаллизации обеспечивает уплотнение металла за счет эффективной пропитки междендритных пространств и компенсации усадки. Также воздействие исключает протекание процессов, приводящих к генерированию дефектов кристаллического строения, ответственных за появление напряжений, трудноустраняемых термической обработкой. Влияние этих напряжений обнаруживается в процессе механической обработки или, что значительно хуже, в процессе эксплуатации изделия, когда в результате перераспределения этих напряжений конструкция теряет требуемую геометрическую точность.

Глава 6. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПЕРЕВОДА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ В СИЛЬНОНЕРАВНОВЕСНЫЕ СОСТОЯНИЯ

6.1. Достижения и проблемы в области использования давления

Безусловным достижением в области теории и технологии литья можно считать использование давления в качестве фактора внешнего механического воздействия, благодаря которому расплав, продавливаемый через щелевидный питатель, приобретает высокую скорость. Тонким технологическим решением здесь является использование эффекта трения, когда часть механической энергии превращается в теплоту, так что в щелевидном канале залитый в камеру прессования и, по существу, остановленный расплав вновь приобретает такие параметры, как перегрев и динамический напор, обеспечивающие доставку в полость формы, сваривание с объемами металла, доставленными ранее, и кристаллизацию в условиях влияния давления.

Однако этот изящный в технологическом смысле процесс имеет вполне определенную область применения. Как правило, это тонкостенные с развитой поверхностью детали преимущественно из Al-, Mg-, Zn-сплавов, обладающих высокими литейными свойствами.

Следующим безусловным достижением явилось использование давления для сжатия и опрессовки кристаллизующегося металла, нашедшее технологическую реализацию в процессах, условно называемых жидкой штамповкой или литьем с кристаллизацией под давлением, о которой речь шла в главе 4. Можно представить, что под влиянием давления, накладываемого при поршневом или пуансонном прессовании, может происходить сжатие жидкого незакристаллизовавшегося металла, что не могло не найти проявления в повышении плотности получаемых отливок. Технологический прорыв в данном направлении выразился в существенном расширении номенклатуры сплавов, включая и деформируемые алюминиевые сплавы, а также в увеличении толщины стенки и массы отливок.

Однако в процессах, нацеленных на создание давления по внешней поверхности отливки, обнаружился существенный недостаток – после затвердевания наружной корки кристаллизация внутренних объемов происходит без влияния давления.

Следующим по значимости достижением вправе считать использование давления для сжатия и опрессовки жидкого незакристаллизовавшегося металла изнутри отливки, из-под корки закристаллизовавшегося металла. Здесь эффект сжимаемости жидкого металла может быть использован в полной мере. В качестве иллюстрации на рис. 97 приведен макротемплет слитка из сплава В95, опрессовка которого плунжером $d_{пл} = 65$ мм не позволила устранить усадочную раковину в массивном сечении. На следующем рис. 98 аналогичный слиток не имеет дефектов усадки, однако по периферии сформировались зоны с характерным дендритным строением, что свидетельствует о недостаточном влиянии давления на формирование кристаллического строения слитка.

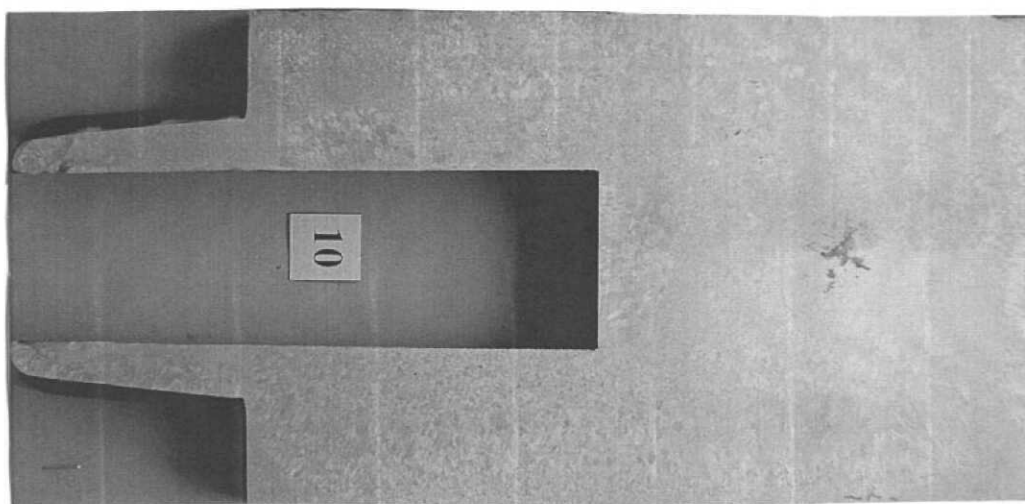


Рис. 97. Слиток $\varnothing 150 \times 185$ мм с дефектами усадочного происхождения



Рис. 98. Слиток $\varnothing 150 \times 173$ мм со следами дендритной структуры

Наконец, на рис. 99, если не считать отдельных фрагментов, структура слитка плотная и однородная в объеме 2200 см^3 .

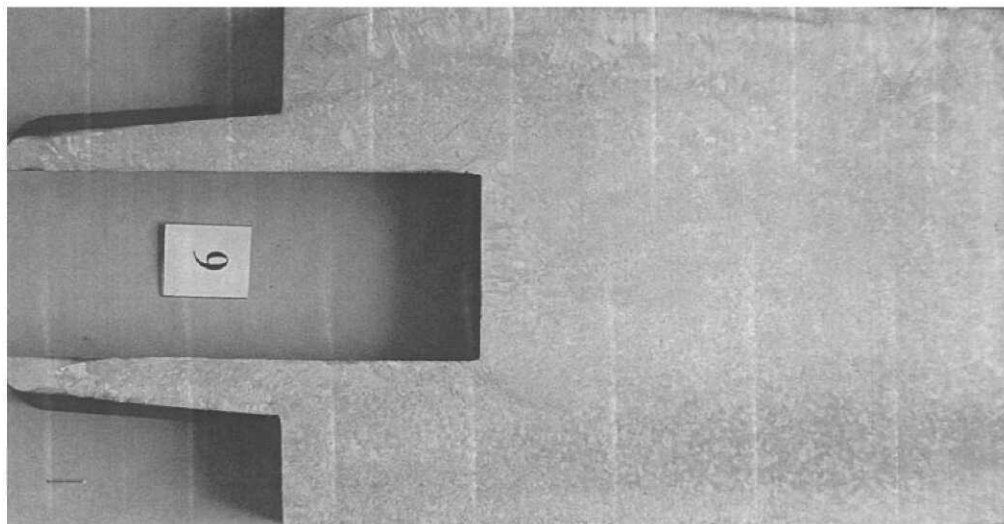


Рис. 99. Слиток $\text{Ø}150 \times 170 \text{ мм}$ с равномерной плотной структурой

В практическом аспекте это достижение может быть в крупных масштабах и с большим экономическим эффектом реализовано в металлургических мини-производствах, в которых удовлетворительное качество слитков тех или иных размеров может быть достигнуто без прокатки,ковки и штамповки. Это достижение особо актуально в отношении прецизионных, в частности инварных сплавов, склонных к формированию грубой дендритной структуры с большими потерями металла, исправляемой в процессе пластического деформирования.

Не менее важным является и теоретический аспект данного достижения. Он заключается в том, что объемная усадка, которая в традиционных процессах устраняется в условиях последовательного направленного затвердевания, когда верхние более нагретые горизонты питают нижние, в данном случае устранена по принципиально иному механизму – она устранена во всем объеме до того как была отведена теплота перегрева. Действительно, у торца плунжера и по поверхности контакта с деталями технологической оснастки видны столбчатые кристаллы, образовавшиеся до наложения давления. В процессе движения плунжера внутрь объема 2200 см^3 было запрессовано столько металла, сколько необходимо для сближения кластеров, захлопывания межкластерных пространств и сжатия растворенных газов. Трудно представить, что атомы сблизались на расстояния, соответст-

вующие их положению в кристаллической решетке в твердом состоянии, но если бы это сближение было недостаточным, то, по крайней мере, в центре объема, как на рис. 97, с неизбежностью физического явления образовалась бы усадочная раковина. Отсутствие усадочной раковины можно воспринимать как переход из жидкого состояния в твердое без изменения объема.

6.2. Влияние давления на температуру начала кристаллизации

Сжимаемость жидкого металла можно рассматривать как один из физических эффектов, связанных с наложением давления. Другим эффектом, возможно тесно связанным с первым, является изменение температуры начала кристаллизации. Ниже, по данным [16], приведена температура плавления некоторых металлов и ее изменение: со знаком плюс – увеличение, со знаком минус – уменьшение при наложении давления 100 МПа:

Металл	Al	Fe	Mg	Cu	Ni	Sn	Pb	Zn	Bi	Sb	Si
$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	660	1539	650	1083	1455	232	327	419	271	630	1430
$\frac{dt/dp, \text{К}}{10^{-2} \text{МПа}}$											
расчет	5,5	2,7	6,3	3,3	2,6	3,2	8,3	3,7	-3,6	-2,8	-5,8
эксперимент	6,4	3,0	7,5	4,2	3,7	4,3	11,0	4,5	-0,38	-0,5	-
изменение при кристаллизации, %	-6,0	-2,2	-5,1	-4,1	-	-2,8	-3,5	-4,2	+3,3	+0,95	-

Изменение температуры плавления зафиксировано и в сплавах. Авторы [121] установили, что при давлении 351,5 МПа температура эвтектического состояния в сплаве типа АЛ2 повысилась на 11–12 $^\circ\text{C}$; аналогичные данные в отношении сплавов системы Fe – С приводятся в работах [122, 123].

Изменение температуры плавления влияет на положение линий диаграмм состояния, что проявляется, например, в повышении концентрации меди в дендритных ячейках сплавов системы Al – Cu [124].

Важно также отметить, что при прочих одинаковых условиях наложение давления приводит к повышению скорости охлаждения [121], которое, однако, связывают с увеличением интенсивности теплообмена между формой и отливкой [82].

В работе [125] влияние давления на формирование кристаллического строения рассмотрено с позиций уменьшения работы образования зародыша кристаллизации. Уравнение, описывающее влияние давления на межфазную энергию на границе расплав – кристалл, можно составить на основании следующей зависимости

$$\sigma = T\alpha R/fN_o^{1/3}(1/V_T^{2/3} - 1/V_{ж}^{2/3})\ln V_{ж}/V_T, \quad (56)$$

где α – структурный коэффициент; f – коэффициент упаковки; N – число Авагадро; V_T , $V_{ж}$ – мольные объемы твердой и жидкой фаз соответственно; R – газовая постоянная; σ – поверхностное натяжение на границе расплав – кристалл. После дифференцирования имеем

$$\frac{\partial \sigma}{\partial p} = \sigma \left[\frac{V_T - V_{ж}}{\ln(1+k)} + \frac{2}{3} \frac{(1+k)^{2/3} V_T - V_{ж}}{(1+k)^{2/3} - 1} \right], \quad (57)$$

где $k = \Delta V/V_T$ – относительное изменение объема при плавлении; V_T , $V_{ж}$ – коэффициенты изотермической сжимаемости твердой и жидкой фаз соответственно.

Расчетным путем установлено, что наложение давления снижает энергию межфазного взаимодействия, а следовательно, снижает и размер критического зародыша, а это в конечном счете и обеспечивает формирование плотной однородной структуры.

Возвращаясь к структуре, представленной на рис. 99, можно дополнить, что под влиянием давления, которое в жидком расплаве распространяется во всем объеме, произошло некоторое повышение температуры начала кристаллизации, что равносильно с точки зрения баланса теплоты переохлаждению расплава. Если к тому же повышение температуры превысило перегрев расплава на величину Δt , достаточную для того, чтобы аккумулировать скрытую теплоту кристаллизации, то фазовое равновесие должно безусловно, сместиться в сторону образования кристаллической структуры.

Однако расчет показывает, что

$$\Delta t = \frac{L}{c} = \frac{394 \cdot 10^3}{1,15 \cdot 10^3} \frac{\text{Дж} \cdot \text{кг} \cdot \text{К}}{\text{кг} \cdot \text{Дж}} = 342 \text{ К}.$$

А давление, которое необходимо создать для перевода всего объема в твердое состояние,

$$p = \Delta t / \frac{\partial t}{\partial p} 10^2 = \frac{342}{6,4} 100 = 5,3 \text{ ГПа}.$$

Фактическое же давление на кристаллизующийся металл $p = 100$ МПа, и, следовательно, физический эффект, связанный с повышением температуры начала кристаллизации, с технологической точки зрения интереса не представляет.

Внимание исследователей, занимающихся проблемой литья с кристаллизацией под давлением, явно проходит мимо такого принципиального вопроса, как выделение скрытой теплоты кристаллизации, хотя этот вопрос, как показано выше, является определяющим в обеспечении устойчивости управления кристаллизацией.

Природа скрытой теплоты кристаллизации, вероятно, кроется в том, что атомы, расположенные на поверхности раздела фаз, имеют больше ненасыщенных межатомных связей по сравнению с атомами внутри фазы. В жидком расплаве межатомные связи, если и возникают, то в пределах кластеров, но статически эти связи неустойчивые. В условиях равновесной кристаллизации формируется кристаллическое строение, в процессе которого каждый взятый в отдельности атом, теряя все степени подвижности, отдает энергию, которой он располагал в расплавленном состоянии. Наложение давления связано с затратами энергии

$$W = \int_v^v p dV.$$

Если принять коэффициент сжимаемости $\xi = 0,1$, то $dV = \xi V = 0,1 \cdot 2200 = 220 \text{ см}^3$. Тогда $W = 100 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2 \cdot 220 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 = 22 \cdot 10^3 \text{ Дж}$. Для сравнения скрытая теплота кристаллизации

$$\begin{aligned} Q = Lm = LV\rho &= 394 \cdot 10^3 \cdot 2200 \cdot 10^6 \cdot 2,6 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{кг}}{\text{кг} \cdot \text{м}^3} = \\ &= 225010^3 \text{ Дж} \approx 22 \cdot 10^5 \text{ Дж}. \end{aligned}$$

Отсюда видно, что механическая энергия, затрачиваемая в процессе наложения давления, на два порядка меньше энергии, выделяющейся в процессе кристаллизации. Поэтому положительное влияние давления на физико-механические свойства отливок вряд ли следует связывать с энергией, поглощаемой материалом отливки в процессе наложения давления. Значительно больший интерес представляет энергия атомов, сближенных под влиянием давления на расстояния, близкие к межатомным расстояниям в кристаллической решетке. Здесь надо иметь в виду, что в отличие от твердого состояния сближение атомов при температуре, превышающей температуру кристаллизации, происходит без образования заторов и преград в виде устойчивых нагромождений дефектов кристаллического строения, а газовая фаза, неизменно присутствующая в расплаве, может выполнять роль разделительной среды, которая, с одной стороны, играет роль смазки, с другой стороны, передает давление на атомы, обеспечивая их равномерное распределение в объеме и одинаковое во всех частях объема сближение на расстояния действия межатомных сил притяжения и отталкивания.

Не вызывает сомнения, что распределение компонентов сплава будет тем более однородным и равномерным, чем больше перегрев расплава. Напротив, приближение к температуре начала кристаллизации будет сопровождаться расслоениями состава, формированием локальной химической неоднородности, характерной для состава твердых фаз, образующихся из жидкости. Поэтому наложение давления при температурах, близких к температуре начала кристаллизации, с большой степенью вероятности будет сопровождаться образованием равновесных или квазиравновесных структур.

Положение изменяется радикальным образом, когда давление накладывается на расплав, перегретый выше температуры начала кристаллизации на 50...80 К. Здесь сближение атомов направлено на то, чтобы зафиксировать их в статике, остановить «Броуновское движение».

Для образования равновесных структур необходимы перемещения атомов различных компонентов на значительные расстояния. Так, при эвтектичном превращении аустенита происходит перераспределение углерода в пределах нескольких десятков периодов кристаллической решетки, в результате чего в обедненной углеродом до 0,02 % металлической основе возникают пластины цементита с содержанием углерода 6,67 %. Эти перемещения происходят методом диффузии по вакансиям, дислокациям, межзеренным границам, которые, уместно заметить, формируются в процессе

равновесной кристаллизации. Можно предположить, что при определенной величине давления можно полностью или в заранее предусмотренных пределах исключить наличие дефектов, по которым осуществляется диффузия атомов. Для отливок сложной конфигурации с переменной толщиной стенки значительный эффект уплотнения и самоорганизации атомов может быть достигнут при импульсном наложении давления [129].

Состояние расплава, перегретого выше линии ликвидус на 50...80 К, в котором атомы распределены по законам жидкого состояния и под влиянием давления, сближение на расстояния действия межатомных сил можно считать сильноравновесным. И если равновесная кристаллизация протекает по одной и той же схеме и всегда приводит к одним и тем же результатам, то число возможных сценариев перехода из сильноравновесных состояний многократно увеличивается. Варьируя таким параметром, как скорость охлаждения, можно по аналогии с мартенситным или эвтектоидным превращениями аустенита в условиях непрерывного охлаждения или изотермической выдержки в широких пределах изменять условия формирования структуры и свойств отливок.

6.3. О формировании структуры из сильнонеравновесных состояний

Из того факта, что в соответствии с зависимостью (57) наложение давления снижает энергию межфазного взаимодействия и приводит к уменьшению размеров кристаллов, вытекает целый ряд следствий.

Во-первых, чем выше давление, тем меньше критический радиус зародыша.

Во-вторых, в условиях наложения давления состояние расплава характеризуется одними и теми же значениями термодинамических параметров, поэтому возможен объемный характер кристаллизации.

В-третьих, можно представить, что в отсутствие путей для диффузии и перераспределения зародышами выступают отдельные атомы или их группировки.

В-четвертых, наложение давления может привести расплав в аморфное состояние.

И наконец, в-пятых, энергия атомов, выделяющаяся в процессе построения кристаллической решетки, может оказаться связанной, заключенной в массе металла, так что характерные для равновесной кристаллизации пло-

щадки и перегибы на кривых охлаждения могут полностью исчезнуть, что и подтверждается экспериментальными данными [121, 127, 128].

Технологическая привлекательность процессов, основанных на опресовке перегретых расплавов, заключается в том, что скрытая теплота не выделяется или выделяется в ограниченных пределах. За счет тепловой аккумуляции металлической формы предоставляется возможным достаточно быстро пройти критический интервал температур $T_{ж.м} - T_{рекр}$. Здесь $T_{ж.м}$ – абсолютная температура рекристаллизации. Дальнейшая обработка с целью формирования требуемой структуры аналогично изотермическому превращению аустенита может быть осуществлена путем выдержки изделия при температуре $T \geq T_{раб}$. Здесь $T_{раб}$ – температура эксплуатации изделия. Предполагается, что в процессе изотермической выдержки в отливке будут протекать процессы, приближающие систему к равновесному состоянию. Если речь идет о дисперсноупрочняемых сплавах, то в результате такой термической обработки прочностные свойства будут снижаться, а пластичность увеличиваться, но это в случае, когда речь идет о традиционных сплавах. Нетрудно представить, что освоение технологии перевода расплавов в сильнонеравновесные состояния будет стимулировать разработку принципиально новых принципов легирования и модифицирования сплавов, что в конечном счете приведет к созданию материалов с более высоким уровнем свойств.

Безусловно, та или иная структура в отливке может быть получена и в условиях непрерывного охлаждения в форме. Но осуществить охлаждение массивных стенок с одинаковой скоростью – задача практически трудно осуществимая. Используя объективное преимущество процесса литья с наложением давления из-под корки закристаллизовавшегося металла – переводить расплав во всем объеме в сильнонеравновесное состояние – следует и последующую термическую обработку проводить в изотермических условиях, когда во всем объеме, во всех сечениях температура распределена равномерно и фазовые превращения развиваются по синхронной кинетике и одинаковому механизму.

6.4. Требования к техническому оборудованию и системам управления

Надо отметить, что создание автоматизированного технологического комплекса с использованием специального гидравлического пресса

ПЛД–300 не только обеспечило промышленное освоение производства широкой номенклатуры отливок из различных сплавов, но и позволило зафиксировать целый ряд закономерностей поведения расплавов под давлением. Высказанные здесь предположения о возможности создания в расплавах под давлением сильнонеравновесных состояний хотя и имеют экспериментальное подтверждение, не противоречат представлениям о строении жидких расплавов [85 – 89], о наследственности в литых сплавах [129, 130], для доведения их до уровня технологий требуют дальнейшей проверки и уточнения. Созданная информационно-измерительная система не оснащена метрологически аттестованными датчиками и преобразователями для экспериментальных исследований температурных полей, а также во время наложения давления. Кроме того, результаты исследований, выполненных с записью температурных, силовых, кинематических и других параметров, определяющих состояние металла в условиях наложения давления, необходимо дополнить данными металлофизических экспериментов. Предстоит разработать целый ряд оригинальных методик микро-рентгеноспектрального анализа, сканирующей электронной микроскопии, дилатометрии и других для изучения поведения новых композиций сплавов под давлением и в процессе последующей изотермической выдержки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На современном этапе развития машиностроения, авиационной, космической, военной и другой специальной техники сложилась ситуация, когда все резервы, которые оставались на направлениях создания конструкций, новых принципов, новых источников энергии, механизации и автоматизации производства, организации и управления практически полностью исчерпаны, а дальнейший прогресс может быть достигнут исключительно за счет создания материалов с качественно более высоким уровнем потребительских свойств. Как никогда востребованы высоконаукоемкие технологии производства таких материалов.

Технология литья с наложением давления, нацеленная на формирование структуры из жидкого расплавленного состояния, наряду с такими утилитарными задачами, как экономия материалов, энергосбережение, снижение трудоемкости, защита экологии, решает важную научно-техническую проблему – создание изделий и заготовок с заданной нанокристаллической структурой.

Выполненные расчеты показывают, что перевод на новую технологию производства инварных сплавов дает экономический эффект более полу-миллиона рублей на тонну продукции. Потребность только одной Германии в таких материалах составляет несколько сот тонн в год.

Разработанный комплекс программно-аппаратных и технологических средств создает предпосылки для того, чтобы воспользоваться сложившейся ситуацией для привлечения необходимых инвестиций.

Другим не менее важным направлением развития исследований может быть создание малотоннажных металлургических мини-производств для утилизации и переработки быстроизнашиваемых деталей прессового, штампового инструмента, а также пресс-форм для литья под давлением. Ежегодно машиностроительные предприятия изготавливают в крупных масштабах различные виды технологической оснастки и инструмента, которые после эксплуатации попадают в металлолом. При этом такие легирующие элементы, как W, Mo, Ni, Ti, V и другие в процессе выплавки практически полностью выгорают. В то же время наш опыт [79, 131] показывает, что отработанные вкладыши штампов и пресс-форм можно восстанавливать при минимальной подшихтовке легирующих элементов и значительных затратах производственных ресурсов, если их переплавлять в вакуумных печах, металл заливать в соответствующие пресс-формы, и на кристаллизующийся металл накладывать соответствующей величины давление. Речь, таким образом, идет о создании металлургических мини-производств, которые могут обеспечивать потребность в инструменте сразу нескольких предприятий. Экономические, экологические и чисто технологические преимущества подобной организации производства совершенно очевидны.

П Р И Л О Ж Е Н И Е