

На правах рукописи



Георгиевский Мирослав Георгиевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ СПЛАВОВ
СИСТЕМЫ Al-Si-Cu-Pb И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗ НИХ
ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ С ЦЕЛЬЮ СОЗДАНИЯ НОВОГО
ПОКОЛЕНИЯ ШЕСТЕРЁННЫХ НАСОСОВ**

Специальность 05.16.04 – Литейное производство

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2013

Работа выполнена на кафедре «Технология металлов и литейных процессов»
Московского государственного открытого университета им. В.С.Черномырдина

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

К.А. Батышев

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Н.А. Белов

кандидат технических наук

А.Я. Денисов

Ведущая организация:

**Открытое акционерное общество
«Научно-исследовательский институт
железнодорожного транспорта»**

Защита диссертации состоится «24» октября 2013 года в 10:00 на заседании Диссертационного Совета Д 212.132.02 при Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС» по адресу: г. Москва, Ленинский проспект, д. 6, ауд. А-305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИТУ «МИСиС».

Автореферат диссертации размещен на официальном сайте Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (<http://misis.ru>). Объявление о защите размещено на официальном сайте Министерства образования и науки РФ (<http://mon.gov.ru>).

Отзыв на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения) просьба направлять по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4, Ученый Совет.

Автореферат разослан «23» сентября 2013 года.

Ученый секретарь
Диссертационного Совета Д 212.132.02,
кандидат технических наук, доцент

А.В. Колтыгин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Инновационный путь развития экономики и конкурентоспособность России на мировом рынке, в последнее время объявленный как приоритетное направление дальнейшего развития страны, не может быть реализован без создания конкурентоспособной продукции с гарантированным техническим уровнем. Производство такой продукции, являющейся объектом интеллектуальной собственности, возможно только пройдя все стадии научно-технического процесса, от исследований и разработки новой продукции до всесторонних испытаний.

Надежность машин и механизмов неразрывно связана с качеством материалов и уровнем технологических процессов на всех стадиях производства. Существенное снижение металлоемкости машин и трудоемкости их производства достигается применением не только высококачественных сплавов, но и прогрессивных технологий.

Среди различных способов изготовления заготовок литье наиболее конкурентоспособно, поскольку позволяет обеспечить однородность структуры и свойств литых деталей, достаточные жесткость и прочность литых конструкций, возможность изготовления заготовок, которые нельзя получить другими способами, и т.п.

Особое место в производстве отливок занимают алюминиевые сплавы, объём выпуска которых во всем мире постоянно увеличивается. Промышленные литейные алюминиевые сплавы имеют достаточно высокую прочность, хорошие технологические свойства, легко обрабатываются. В ряде отраслей промышленности наблюдается тенденция замены чугуна, стали и медных сплавов алюминиевыми сплавами. Относительно высокая стоимость алюминиевых сплавов по сравнению с чугунами и сталями компенсируется значительным снижением массы деталей и трудоёмкости их механической обработки. В свою очередь, снижение массы деталей дает экономический эффект вследствие снижения расхода топлива при эксплуатации машин и агрегатов, что особенно характерно для транспортного, тракторного и сельскохозяйственного машиностроения.

В последние годы большое внимание уделяется изучению износостойкости алюминиевых сплавов, а также разработке новых сплавов для литых деталей, работающих в условиях трения скольжения в паре с деталями из стали и чугуна. Отлив-

ки из таких сплавов чаще всего изготавливают литьём в кокиль и весьма редко литьём с применением давлений.

Настоящая работа обусловлена необходимостью создания пятого исполнения шестерённых насосов для мобильной гидравлики по номенклатуре ОСТ 23.1.92-88 с подачей 32 см³/об и более, предназначенных для работы на любых смазывающих жидкостях при постоянном рабочем давлении 25...28 МПа. Жесткие требования по габаритным и присоединительным размерам разрабатываемых насосов для обеспечения их взаимозаменяемости с существующими насосами (третьего и четвертого исполнений) в гидросистемах мобильных машин выявили проблемы при использовании для создания новых насосов традиционных материалов и способов получения отливок для корпусных и антифрикционных деталей.

Для решения этих проблем была создана научно-производственная организация ОАО «Гидромаш» – первое предприятие в гидромашиностроении России, освоившее совместно с МГОУ технологию *литья с кристаллизацией под давлением* (ЛКД).

ЛКД является одним из специальных способов литья алюминиевых сплавов. Оно обеспечивает достижение высоких механических и специальных свойств литых деталей, а также существенный экономический эффект за счёт отсутствия литниковых систем и припусков, уменьшения припусков на механическую обработку.

Имея очевидные достоинства способ ЛКД не получил еще широкого распространения в гидромашиностроении из-за недостаточного развития теоретических и технологических основ производства отливок из антифрикционных алюминиевых сплавов. К числу недостаточно решенных вопросов можно отнести теплосиловые условия получения отливок из антифрикционных алюминиевых сплавов, содержащих олово или свинец, кинетику уплотнения формирующихся заготовок и его последствия, изучение структуры, механических и антифрикционных свойств сплавов и отливок.

Цель работы. Разработка антифрикционных алюминиевых сплавов и технологии изготовления из них литых деталей для повышения эффективности и надежности шестерённых насосов.

Решались следующие задачи:

1. Выбор и определение рациональных составов антифрикционных алюминиевых сплавов и технологии их литья.
2. Исследование затвердевания и охлаждения отливок.
3. Изучение усадки и ликвации в отливках.
4. Исследование структуры, механических и фрикционных свойств отливок.
5. Разработка и внедрение в производство технологии ЛКД антифрикционных алюминиевых сплавов.
6. Оценка эффективности и надежности работы шестерённых насосов нового поколения с деталями из новых антифрикционных алюминиевых сплавов.

Научная новизна определяется следующими результатами.

1. Установлены закономерности формирования отливок из антифрикционных алюминиевых сплавов, содержащих свинец. Показано, что характер затвердевания и уплотнения под воздействием давления формирующихся отливок из исследованных сплавов является идентичным для подобных отливок из других алюминиевых сплавов. Различие наблюдается во времени затвердевания отливок и степени их уплотнения при затвердевании, что связано с различными теплофизическими и механическими свойствами сплавов.

2. Определена роль механического давления в развитии ликвационных процессов в отливках из алюминиевых сплавов, содержащих свинец. Показано, что давление подавляет его ликвацию по плотности, но при определённых условиях приводит к обратной ликвации.

3. Установлено, что добавка в медистые силумины свинца приводит к незначительному увеличению литейной усадки отливок, затвердевших под давлением, при этом наибольшее влияние на ее величину оказывает давление прессования.

4. Показано совместное влияние содержания свинца в алюминиевых сплавах и давления прессования при кристаллизации на фрикционные свойства отливки в паре трения с легированной сталью (при трении скольжения со смазкой). На основании установленных закономерностей обоснованы оптимальные величина давления прессования и содержание свинца в сплавах, обеспечивающие низкие значения коэффициента трения и высокую износостойкость как стальных, так и алюминиевых деталей.

Практическая значимость работы:

1. Разработано несколько составов литейных антифрикционных сплавов на основе медистых силуминов без добавок и с добавками свинца, один из которых защищен патентом РФ № 2226569.

2. Технологический процесс ЛКД заготовок компенсаторов и втулок из новых антифрикционных сплавов внедрён в производство ОАО «Гидромаш» (Московская обл.).

3. В промышленных условиях отработана технология ЛКД для наиболее ответственных деталей шестерённых насосов – компенсаторов торцевого уплотнения и втулок подшипников скольжения с низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью. Изготовленные из них детали позволили достичь постоянного рабочего давления в шестерённых насосах 25...28 МПа, снизить их массу и себестоимость. Снижение себестоимости достигнуто за счет уменьшения числа операций механической обработки отливок компенсаторов и втулок, а также использования более дешёвого алюминиевого сплава взамен оловянной бронзы (для компенсатора) или оловосодержащего алюминиевого сплава (для втулок).

3. Показатели эффективности и надёжности шестерённых насосов с новыми деталями «Компенсатор» и «Втулка» как минимум в два раза выше аналогичных насосов производства стран СНГ и Европы.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на XI Международной научно-практической конференции «Металлургия легких металлов. Проблемы и перспективы» (Москва, 2006 г.), Российской научно-технической конференции «Новые материалы, прогрессивные технологические процессы и управление качеством в заготовительном производстве» (Рыбинск, 2007), IV и VI Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии» (Москва, 2007, 2011 гг.), Всероссийской научно-практической конференции «Теория и практика литейных процессов» (Новокузнецк, 2012 г.).

Публикации. Основные материалы диссертации опубликованы в 24 печатных работах, в том числе в 12 статьях (из них 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах по перечню ВАК) и 12 патентах РФ на изобретение и полезную модель.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы, содержит 135 страниц, 63 рисунка, 13 таблиц и 146 литературных источников.

Достоверность научных результатов. Достоверность полученных результатов подтверждается применением современных методов и методик исследования, хорошей воспроизводимостью и согласованностью результатов исследований, положительными результатами использования в промышленности разработанных рекомендаций по применению способа ЛКД. Текст диссертации и автореферат проверены на отсутствие плагиата с помощью программы «Антиплагиат» (<http://antiplagiat.ru>).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержатся общие сведения о диссертации, обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования.

В первой главе представлен обзор литературы, в котором анализируются составы и свойства некоторых антифрикционных медных и алюминиевых сплавов, в том числе закристаллизованных под давлением. Отливки из таких сплавов изготовляют преимущественно литьем в кокиль; ОАО «Гидромаш» освоило изготовление отливок из антифрикционного алюминиевого сплава АОЗ-7 (ГОСТ 14113-78) способом ЛКД.

Рассмотрены варианты традиционного процесса ЛКД: поршневое, пуансонное и пуансонно-поршневое прессование. Каждый из этих вариантов непрерывно совершенствуется (преимущественно за счет создания новых конструкций технологической оснастки – пресс-форм).

В большинстве работ описано применение традиционных схем прессования при ЛКД сплавов цветных металлов, главным образом, алюминиевых. Большинство исследователей указывает на то, что основным фактором, оказывающим наибольшее влияние на структуру и свойства отливок, является давление прессования, затем температура заливки, начальная температура пресс-формы и время выдержки расплава в последней до приложения давления.

Подчеркивая приоритет нашей страны в разработке способа ЛКД, также отмечаются работы зарубежных специалистов из Японии, США, Великобритании, Индии, Чехии, Словакии, Польши, Франции, Германии и других стран. Следует отметить, что число публикаций по ЛКД в течение последних лет резко сократилось, а среди имеющихся преобладают работы китайских исследователей.

Во второй главе представлена методика исследований. При выборе сплава для исследований были поставлены следующие требования. Сплав не должен содержать олова, который является дорогим металлом, должен иметь антифрикционные характеристики, не уступающие подобным характеристикам сплавов с добавками олова, и хорошую обрабатываемость резанием.

Для исследований выбрали медистые силумины, содержащие примерно такое же содержание меди, как и антифрикционный сплав АОЗ-7 ГОСТ 14113-78, предва-

рительное опробование которых при ЛКД показало удовлетворительные результаты; олово было заменено кремнием (2...7 %) и свинцом (добавка 1...10 %); большинство опытов было проведено на медистом силумине типа АК7М6. Несколько опытов было проведено с использованием бинарного сплава Al–6%Pb, для приготовления которого использовали алюминий А7 ГОСТ 11069-74.

В качестве шихты использовали чушки из сплавов АК5М7 и АК7М6, которые плавил под слоем флюса в графитошамотных тиглях вместимостью 0,9 кг в шахтных печах сопротивления типа СШОЛ-1,1,6/12 с автоматической регулировкой температуры рабочего пространства. Сплавы плавил под слоем защитного флюса. Температуру расплава в тигле измеряли хромель-алюмелевой термопарой погружения с незащищенным спаем и регистрировали переносным милливольтметром типа МПП-254. Диаметр электродов составлял 0,3 мм, точность измерения температуры заливки $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

Объектом опытов были цилиндрические отливки, изготовленные способом ЛКД и в условиях атмосферного давления. В лабораторных и производственных условиях для исследований также отливали заготовки компенсаторов, втулок и дисков различной конфигурации и массы.

Технологические режимы литья и прессования изменяли в следующих пределах: температура заливки сплава $t_{\text{зал}} = 650...760^{\circ}\text{C}$; температура матрицы пресс-формы $t_{\text{пф}} = 50...200^{\circ}\text{C}$; давление прессования $p_{\text{н}} = 0,1 ... 320$ МПа; время выдержки расплава в матрице до приложения давления $\tau_{\text{д}} = 3...4$ с и под давлением $\tau_{\text{п}} = 1$ с на каждый 1 мм толщины стенки (радиуса); смазка – машинное масло.

Исследование затвердевания и уплотнения формирующихся отливок проводили на цилиндрических отливках диаметром 50 мм и высотой 100...105 мм в условиях поршневого прессования. Для изучения процессов затвердевания и уплотнения формирующихся отливок применяли установку, разработанную в ВЗПИ-МГОУ. Схема ее приведена на рисунке 1.

В пресс-форме, состоящей из матрицы 12 с толщиной стенки 60 мм, основания 11 толщиной 30 мм и пуансона 6, три термопары 10 закрепляли в основании таким образом, чтобы они располагались на расстояниях 6; 12,5 и 25 (центр) мм от вертикальной рабочей поверхности матрицы. Их спаи были расположены на расстоянии

50 мм от верхнего торца и основания 11 и не защищались теплоизоляционным покрытием. Для измерения температуры затвердевающих отливок использовали термопары типа КТХАС (ГОСТ23847-79) со стальной оболочкой, имеющей наружный диаметр 1,5 мм, и хромель-алюмелевые электроды диаметром 0,2 мм. Точность измерения температуры составляла $\pm 5^\circ\text{C}$. Обычные хромель-алюмелевые термопары 9 (диаметр электродов 0,3 мм) использовали для измерения температуры стенки матрицы в точках, расположенных на расстояниях 1, 5, 10, 15 и 20 мм от рабочей (внутренней) поверхности (на равном расстоянии от торцов) и на расстоянии 1 мм – в трех точках по высоте (рисунок 1).

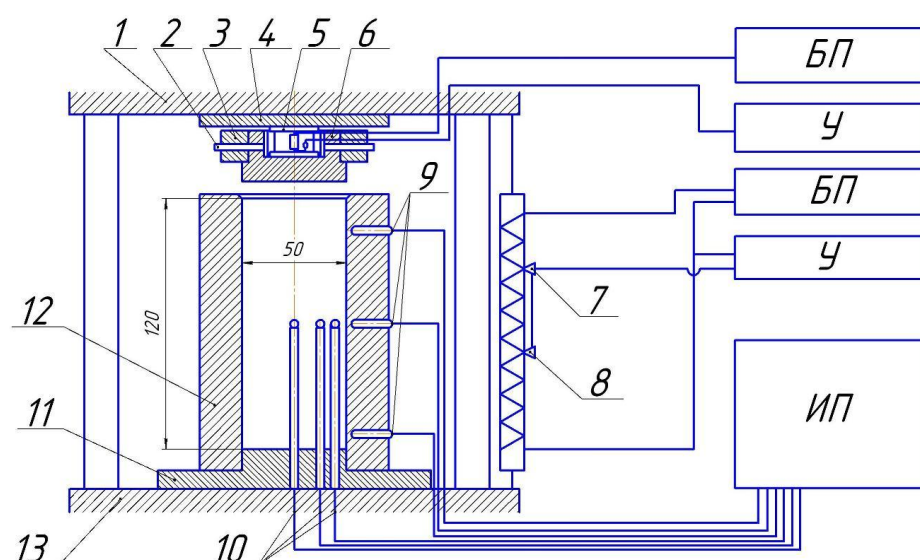


Рисунок 1 – Схема установки для изучения процессов затвердевания и уплотнения формирующихся отливок:

1 – траверза, 2 – штырь, 3 – пуансонодержатель, 4 – верхняя плита, 5 – месдоза, 6 – пуансон, 7, 8 – датчики перемещения, 9, 10 – термопары, 11 – основание, 12 – матрица, 13 – стол пресса; БП – блок питания, У – усилитель, ИП – измерительный прибор

Измерение усилия, а, следовательно, и давления прессования осуществляли с помощью тензометрической месдозы 5 цилиндрической формы с диаметром рабочей поверхности 45 мм и высотой 70 мм. На боковую поверхность месдозы наклеивали тензометрические датчики с базой 20 мм и сопротивлением 200 Ом (каждый). Рабочие и компенсационные датчики соединяли по схеме моста, для повышения, чувствительности которого каждое плечо имело по два датчика, соединенных последовательно. Таким образом, общее сопротивление каждого плеча моста составляло 400 Ом. Запись показаний всех термопар, датчиков давления и перемещения

ползуна пресса одновременно записывали на ленте осциллографа НО30А или компьютере.

Опыты проводили на гидравлическом прессе модели Д2430Б с номинальным усилием 1 МН (100 тс), при проведении опытов усилие пресса регулировали в заданных пределах с помощью регулятора давления в гидросистеме пресса.

Все отливки подвергали 100 %-ному внешнему осмотру, затем проводили измерения диаметра каждой отливки на нескольких уровнях по высоте и рассчитывали величину литейной усадки.

Распределение склонного к ликвации свинца изучали на отливках, изготовленных в условиях атмосферного давления и полученных способом ЛКД. Так как на темплетах отливок, изготовленных ЛКД, компактных выделений свинца не было обнаружено даже после травления специальными реактивами, то для определения содержания свинца в слитках высверливали стружку на расстоянии 3...4 мм от верхнего и нижнего торцов, полученную стружку растворяли щелочно-кислотным методом, после чего раствор анализировали на приборе ААС-1 фирмы Carl Zeiss JENA.

Микроструктуру образцов изучали на оптических микроскопах МИМ-8 и Neofot-21 и сканирующем электронном микроскопе JSM-35-CF.

Механические свойства сплавов и отливок исследовали на машине УМЭ-10ТМ с автоматической записью величины приложенной нагрузки.

Для оценки фрикционных характеристик алюминиевых сплавов опытные образцы (втулки) вырезали из цилиндрических отливок диаметром 50 мм и высотой 60...65 мм, изготовленных литьем в кокиль, а также из полученных способом ЛКД и затвердевших под воздействием различного по величине давления прессования. В качестве образцов использовали втулки, одна из которых вращалась вокруг своей оси (сталь 18ХГТ или 95Х18 с твердостью 60 HRC) и терлась о торец неподвижной втулки, изготовленной из исследуемого алюминиевого сплава, в которой были зачеканены термопары для измерения температуры в зоне трения. Испытания проводили на машинах трения УМТ-1 и ИМ-58. Во время испытаний на компьютере записывали температуру поверхности алюминиевого образца вблизи поверхности трения и нагрузку.

В третьей главе рассмотрены исследования затвердевания и уплотнения при затвердевании отливок из медистых силуминов с добавлением и без добавки свинца.

Графики охлаждения отливки из сплава АК7М6 (1, 2, 3), продвижения фронта затвердевания (границ ликвидус 7 и солидус 6), изменения давления прессования p и относительного перемещения верхнего торца отливки h/H (где h – величина перемещения пуансона с момента приложения давления, мм; H – высота отливки, мм) под воздействием давления приведены на рисунке 2.

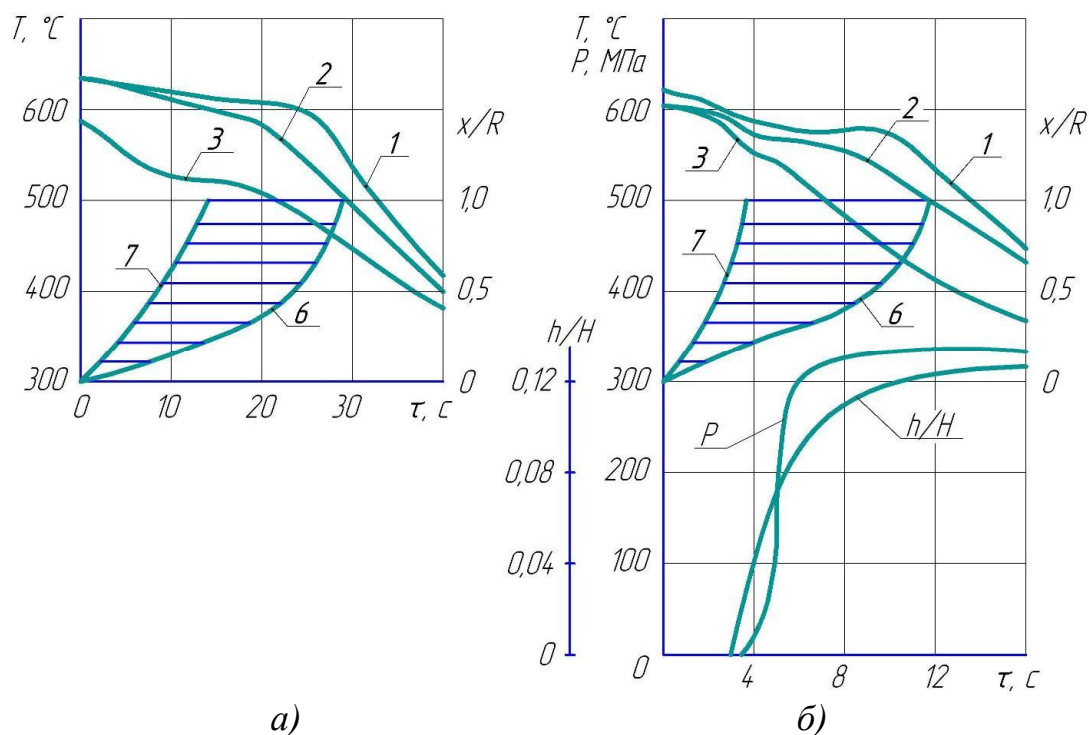


Рисунок 2 – Кривые охлаждения отливок (1, 2, 3) из сплава АК7М6 и продвижения фронтов с температурами ликвидус 7 и солидус 6, изменения давления прессования p и относительного перемещения верхнего торца отливки h/H :

*а, б - давление атмосферное и 320 МПа соответственно;
1, 2, 3 – на расстоянии 25, 12,5 и 6 мм от поверхности*

Их анализ показывает, что при переходе от атмосферного к механическому давлению в 320 МПа время затвердевания отливок уменьшается от 29 до 12,5 с, т.е. в 2,3 раза. Наблюдается повышение температуры ликвидус сплава на 6 °С (что может быть объяснено главным образом применением к процессу ЛКД закона Клаузиуса-Клайперона), увеличение перепада температур по сечению цилиндрической отливки от 100 до 210 °С. Относительная температура поверхности слитка $t_{\pi}/t_{ц}$, где t_{π} – температура поверхности цилиндрической отливки, °С; $t_{ц}$ – температура его

центральной зоны в момент окончания затвердевания сплава, снижается от 0,68 до 0,51, а время затвердевания центральной зоны (с момента окончания стояния температуры ликвидус) уменьшается от 17 до 8,5 с при переходе от атмосферного давления к механическому в 320 МПа.

Характер роста корки (продвижения температуры солидус – кривые б) может быть выражен параболой второго порядка:

$$x/R = K_o \tau^2 \quad (1)$$

или

$$x = K \tau^2, \quad (2)$$

где x – толщина растущей корки, мм; τ – время, с; K_o – относительный коэффициент затвердевания, R – радиус отливки, мм; $K = K_o/R$ – коэффициент затвердевания, величина которого при атмосферном давлении составляет $0,03 \text{ мм/с}^2$, а при давлении 320 МПа – $0,16 \text{ мм/с}^2$.

Относительное перемещение пуансона (верхнего торца отливки) в момент окончания затвердевания отливки $(h/H)_з = 0,07$ при номинальном давлении $p_n = 160$ МПа и 0,092 при $p_n = 320$ МПа.

Из приведенных зависимостей (рисунок 3, кривая 1) видно, что наибольшее уменьшение времени затвердевания отливок наблюдается в области давлений от атмосферного до 150...160 МПа, при последующем повышении давления время затвердевания также уменьшается, но в значительно меньшей степени.

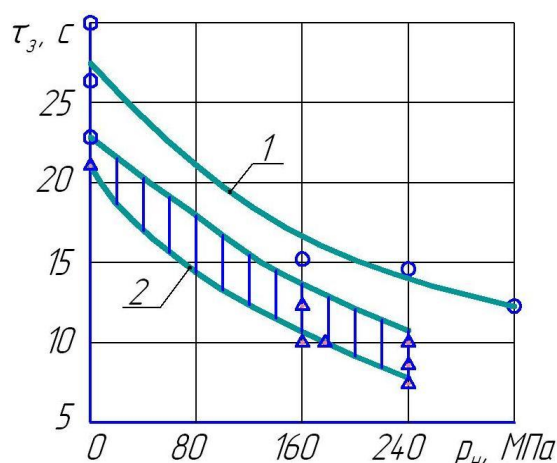


Рисунок 3 – Зависимость от давления времени затвердевания отливок из сплава АК7М6:

1 – без добавки свинца; 2 – с добавками 2, 4 и 6 % Pb (заштрихованная область)

Это можно объяснить тем, что в первой области давлений имеет место плотное прижатие растущей корки к стенкам матрицы и, как следствие, вначале уменьшение (при давлениях до 80 МПа), а затем и устранение (при давлениях 150...160 МПа) зазора между боковыми поверхностями отливки и формы, в результате чего возрастают скорости отвода теплоты перегрева и кристаллизации.

При давлении свыше 160 МПа происходит дальнейшее уменьшение величины зазора за счет впрессовывания металла отливки в микрорельеф рабочей поверхности формы (матрицы) со всеми вытекающими отсюда последствиями. Однако прирост поверхности охлаждения отливки при этом намного меньше, чем в первой области давлений; поэтому и меньше влияние давления на время затвердевания литой заготовки и другие параметры процесса ЛКД.

Приведенное объяснение подтверждается тем, что после снятия давления (до 160 МПа) и включения толкателя отливка легко удаляется из матрицы (при отсутствии уклона на ее рабочей поверхности), а после снятия давления в 320 МПа сразу удалить отливку из матрицы невозможно; необходимо выдержать ее в матрице определенное время или смазать верхний торец отливки машинным маслом.

Как было показано выше, при переходе от атмосферного к механическому давлению (320 МПа) время затвердевания цилиндрических отливок уменьшается от 29 до 12,5 с, добавка свинца в сплав АК7М6 приводит к уменьшению времени затвердевания заготовок, но не изменяет характера затвердевания и уплотнения отливок (рисунок 3, область 2). Такие результаты на первый взгляд являются неожиданными, так как известно, что любое дополнительное легирование сплава приводит к изменению его физических свойств и, как правило, к увеличению времени затвердевания отливки. Уменьшение времени затвердевания отливок из сплавов с добавками свинца, по-видимому, связано с изменением условий теплообмена на границе раздела «отливка – форма» из-за вытеснения свинца в зазор между поверхностью отливки и матрицей, а также с отводом теплосодержания сплава вместе с потоком свинца из внутренних зон к наружным. При этом характер роста корки не изменяется (кривые 6 и 7 на рисунке 2), зависимости могут быть описаны параболой второго порядка (см. формулу (2), в которой коэффициент затвердевания изменяется от 0,174 мм/с²

(сплав АК7М6 без добавки свинца) до 0,25 и 0,52 мм/с² (сплав с добавками 4 и 6 % Pb, давление 240 МПа).

Измерение размеров отливок по диаметру показало, что при отсутствии уклона на вертикальных стенках рабочей полости матрицы диаметр одной и той же отливки не является постоянным по высоте – при переходе от верхнего торца к нижнему величина литейной усадки отливки, изготовленной ЛКД, увеличивается. С увеличением давления прессования средняя величина литейной усадки отливок уменьшается. При постоянном давлении прессования с увеличением добавки свинца в сплав АК7М6 литейная усадка отливок практически не изменяется, небольшая тенденция к ее увеличению имеет место у отливок, формирующихся в условиях атмосферного давления. Изменение температуры заливки расплава в пределах 650...720 °С (при постоянном $p_n = 160$ МПа) практически также не отражается на величине литейной усадки отливок. Результаты обработки экспериментальных данных по измерению линейных размеров отливок и расчету величины их литейной усадки приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Литейная усадка отливок с $H/D = 1,2$

Сплав	p_n , МПа	Диаметр (D_i), мм / литейная усадка (ε_i), %			$\varepsilon_{ср}$, %	H , мм
		верхняя зона	средняя зона	нижняя зона		
АК7М6+6%Pb	0.1	49.50/1.0	49.45/1.1	49.45/1.1	1.07	68
	160	49.90/0.2	49.80/0.4	49.78/0.5	0.37	65
	160	48.85/0.3	49.75/0.5	49.70/0.6	0.46	62
	240	49.90/0.2	49.85/0.3	49.80/0.4	0.3	65
	240	49.95/0.1	49.90/0.2	49.80/0.4	0.23	62
А7+6%Pb	0.1	49.10/1.8	49.00/2.0	49.00/2.0	1.93	68
	160	49.95/0.1	49.90/0.2	49.80/0.4	0.23	59
	160	49.95/0.1	49.85/0.3	49.85/0.3	0.23	60
	240	49.95/0.1	49.90/0.2	49.95/0.1	0.13	60
	240	49.95/0.1	49.90/0.2	49.90/0.2	0.16	60

Определено, что главным параметром, влияющим на величину литейной усадки отливок, является состав сплава и давление прессования при кристаллизации. Опытным путем также подтверждены данные, что усадочные раковины и поры, имеющиеся в отливках, изготовленных из сплава АК7М6 с добавками свинца при невысоких давлениях прессования (до 160 МПа), расположенные в зоне теплового

центра, при увеличении добавки свинца уменьшаются, а при давлении 240 МПа полностью устраняются.

В четверной главе представлено исследование ликвации свинца в сплавах и отливках, проведенное в условиях атмосферного давления, а также ЛКД при различных давлениях прессования и температурах заливки. В отливках, полученных в условиях атмосферного давления, выявлена зональная ликвация свинца по плотности; при этом зона с повышенным содержанием свинца тем больше, чем больше содержание свинца в алюминиевом сплаве. При ЛКД создаются условия, препятствующие развитию ликвации свинца по плотности. Наиболее качественные отливки в этом отношении получены при $t_{зал} = 650 \dots 700$ °C и $p_n = 240$ МПа.

Выявлена обратная ликвация свинца в отливках из медистых силуминов, изготовленных ЛКД, проявляющаяся в образовании наружной свинцовой «оболочки» в виде стакана, охватывающего нижний торец и прилегающую к нему вертикальную (боковую) поверхность цилиндрической отливки. Вероятность образования указанной «оболочки» возрастает с повышением давления прессования. Чаще всего она наблюдалась на отливках, затвердевших под давлением 160 и 240 МПа.

Толщина «оболочки» равна $\sim 0,1$ мм (на вертикальных стенках отливки) и $0,1 \dots 0,3$ мм со стороны нижнего торца. Протяженность последней по высоте (от нижнего торца) зависит от величины добавки свинца в расплав; с ее увеличением протяженность свинцовой «оболочки» на боковой поверхности отливки также увеличивается.

Для определения количества свинца, выдавленного в поверхностные слои, свинцовую «оболочку» отделяли от боковой поверхности отливки и взвешивали, а со стороны дна вначале определяли среднюю толщину «оболочки» и затем рассчитывали ее массу. Сопоставление количества введенного и выдавленного свинца позволило приближенно оценить коэффициент усвоения легирующего элемента K_y , являющегося отношением оставшегося в сплаве свинца к количеству введенного в расплав.

Для уточнения коэффициента усвоения свинца при ЛКД проведено изучение его распределения по высоте отливки. Установлено, что содержание свинца в верхних зонах цилиндрических отливок, как правило, выше, чем в нижних, хотя и незна-

чительно. В отдельных опытах (отливки с добавкой 8 % Pb) в нижних зонах содержание свинца было несколько больше, чем в верхних. С увеличением давления от 160 до 240 МПа содержание свинца в верхних зонах отливки возрастает, что может быть объяснено увеличением скорости затвердевания и охлаждения отливки.

Практически весь свинец остается в сплаве (и отливке) при вводе его в количестве 1 %; при добавке 2 % содержание его в верхних зонах отливки составляет 1,38 % (при коэффициенте усвоения $K_y = 0,69$). При вводе 4 и 6 % Pb коэффициент K_y находится в пределах 0,40...0,45. Дальнейшее увеличение количества вводимого в расплав свинца до 8 и 10 % коэффициент K_y снижается до 0,15...0,20, что, по-видимому, связано с большими потоками выдавливаемого свинца по междендритным каналам кристаллизующегося сплава.

Исследовано влияние следующих факторов на коэффициент усвоения свинца в сплавах и отливках, затвердевших под давлением:

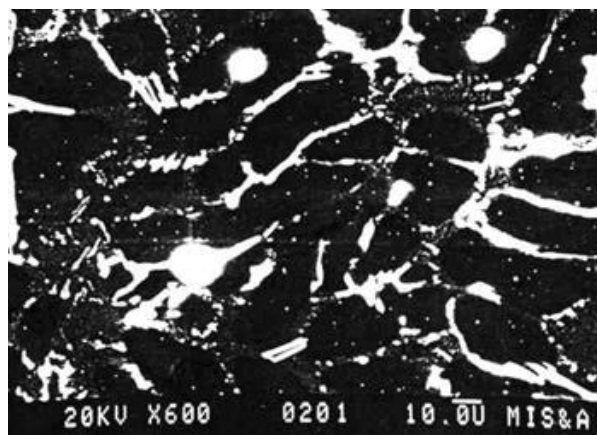
- 1) заливка расплава в жидко-твердом состоянии ($t_{зал} = 550 \pm 5$ °C);
- 2) предварительная обработка расплава рафинирующе-модифицирующим флюсом с последующим вводом свинца под слой флюса;
- 3) повышенная скорость охлаждения сплава.

В первом случае коэффициент усвоения свинца практически не изменился. Во втором – добавка свинца в расплав под слой флюса способствует повышению коэффициента усвоения свинца, но не настолько существенно, как ожидалось. Повышение скорости охлаждения сплава достигали за счет слива небольшой дозы расплава на толстую (100 мм) стальную плиту, в результате образовывалась пластина толщиной 3...4 мм, которая затвердевала в условиях атмосферного давления. При добавке в расплав 4 % Pb содержание последнего в пластине составляло 3,58 % (при $K_y = 0,89$).

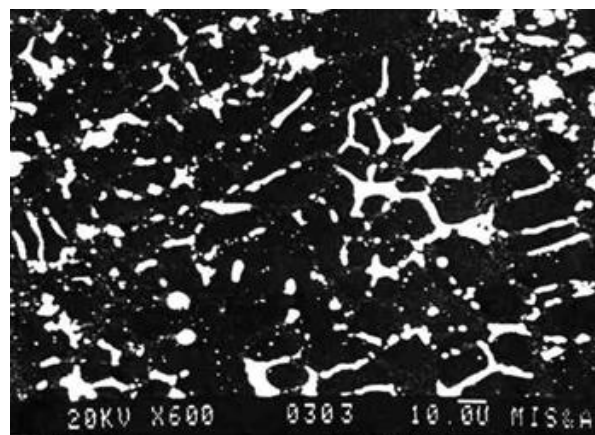
Как и при ЛКД других алюминиевых сплавов, макроструктура отливок из исследованных медистых силуминов измельчается с увеличением давления прессования при кристаллизации. Добавка свинца в сплавы на макроструктуре отливок практически не отражается. Следует отметить, что макроструктура отливок, формировавшихся под давлением 240 МПа, выявлялась с трудом.

Микроструктура отливок имеет характерное для литого металла дендритное строение, в ней наблюдаются включения тёмного цвета, форма которых близка к сферической, а размеры находятся в пределах 5...30 мкм. По данным микрорентгеноспектрального анализа эти включения являются частицами свинца. Свинец, не взаимодействуя с алюминием и основными легирующими элементами сплава (кремнием и медью) и имея более низкую температуру кристаллизации, чем матрица, при охлаждении отливки кристаллизуется в виде сферических капель, расположенных в междендритных объемах. Не выявлена зависимость размеров включений свинца от давления прессования при кристаллизации.

Матрица сплавов в отливках, изготовленных ЛКД, представляет собой пересыщенный твердый раствор. Микроструктура отливок, выявленная с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), приведена на рисунке 4. Она характеризуется следующими структурными составляющими: алюминиевый твёрдый раствор – тёмный фон; частицы кремния – серые прожилки (плохо видны); FeSiAl_5 (β -фаза) – иглы (белые); $(\text{FeMn})_3\text{Si}_2\text{Al}_5$ (α -фаза) – скелеты (белые); CuAl_2 и CuMgSiAl (ω -фаза) – с прожилками (белая); свинец – округлые белые включения (мелкие и крупные).



а)



б)

Рисунок 4 – Микроструктура отливок из сплава АК7М6+4%Рb (СЭМ):
а, б – давление 160 и 240 МПа

Определены температурные интервалы превращений в сплаве при нагреве методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) с использованием калориметра DSC 111 (Франция). На кривых ДСК при нагреве сплавов со свинцом выявлены пики, обусловленные распадом твердого раствора (в области температур

188...272 °С), растворением высокотемпературной фазы (430...539 °С) и плавлением сплава (539...610 °С). Термического эффекта, обусловленного плавлением свинца, на кривых ДСК не наблюдалось, что может быть связано с малой величиной термического эффекта при плавлении свинца и его небольшим содержанием в сплаве.

Механические свойства отливок (σ_b , δ) определяли на образцах диаметром 5 мм с головками диаметром 11 мм и рабочей длиной 30 мм. Они отличались от образцов, рекомендованных ГОСТ 1583-89 для алюминиевых сплавов, что отразилось на полученных результатах (в сторону снижения показателей прочности и пластичности из-за разрыва в местах перехода от головки к рабочей длине). В обобщенном виде зависимости показателей механических свойств отливок из медистых силуминов (с добавками и без добавок свинца) приведены на рисунках 5, 6.

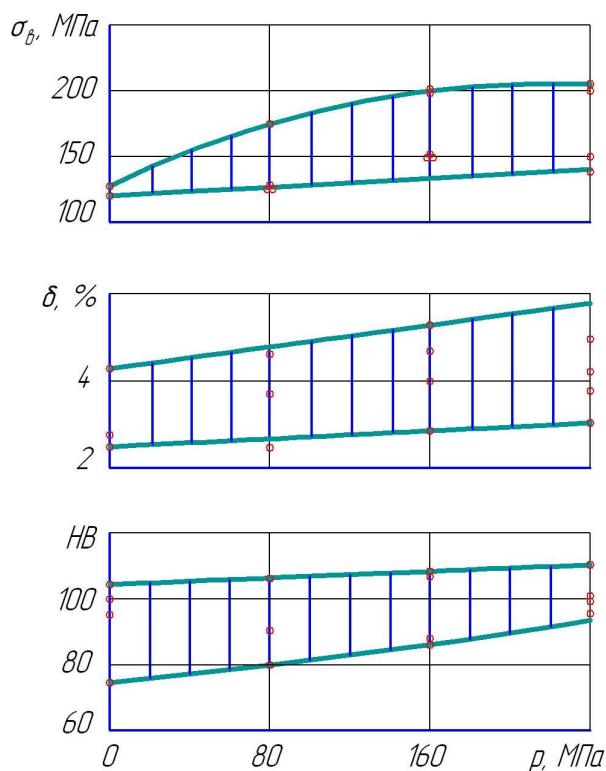


Рисунок 5 – Зависимость показателей механических свойств отливок из сплава АК7М6 (без добавок и с добавками свинца) от давления прессования при кристаллизации

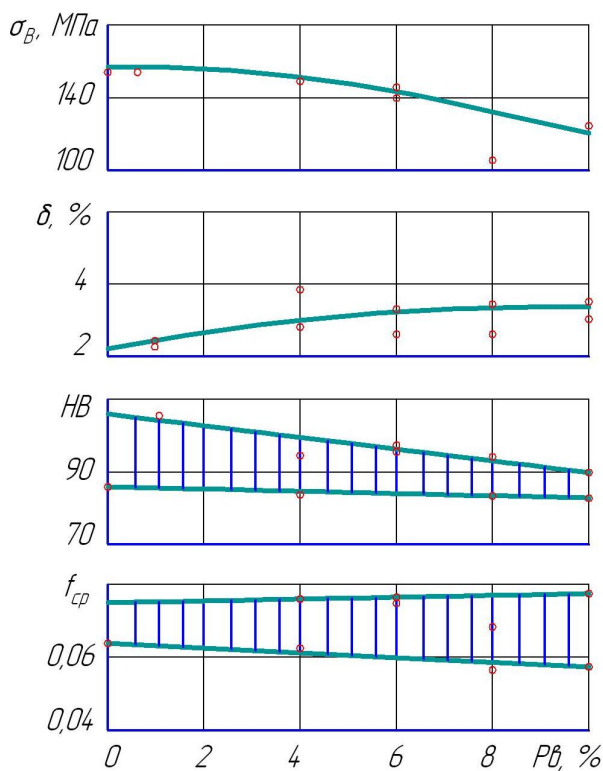


Рисунок 6 – Зависимость показателей механических свойств и коэффициента трения сплава АК7М6 от добавки свинца (давление 160...240 МПа)

Они свидетельствуют о том, что с увеличением давления прессования σ_b , δ и HB повышаются: σ_b – на 40...60 %; δ – на 50...60 %; HB – на 30...35 %. При постоянном давлении прессования с увеличением величины добавки свинца в сплав

АК7М6 прочностные характеристики отливок снижаются, а пластические – незначительно повышаются. Тем самым подтверждаются данные других исследователей о том, что и в кокильных отливках пластичность сплава АК9+Pb выше, чем у сплава АК9 без добавки свинца.

Исследование фрикционных характеристик медистых силуминов оценивали по результатам испытаний трех образцов, закристаллизованных под различным давлением. Результаты испытаний по сплаву АК7М6 приведены в таблице 2 и показаны на рисунке 7.

Таблица 2 – Фрикционно-износные характеристики сплава АК7М6+Pb

№№ обр.	Добавка Pb, %	p_n , МПа	t_m , °С	f		ΔQ_{Al} , мг	$\Delta Q_{Ст}$, мг	Δh_{Al} , мкм	J_h	Характеристика поверхности трения алюминиевого об- разца	Примечания
				мин.	макс.						
105	0	160	160	0,063	0,08	3,5	1,5	4,3	$0,97 \cdot 10^{-8}$	Риски, темные полосы, буртик	
103	0	240	145	0,045	0,085	23,3	0,6	28	$0,3 \cdot 10^{-8}$	Буртик	
308	4	0,1	160	0,066	0,087	5,1	1,7	6,4	$0,97 \cdot 10^{-8}$	Темные полосы, риски	
305	4	80	215	0,035	0,10	115	2,0	139	$1,52 \cdot 10^{-8}$	Двухсторонний желоб	Пластификация смазки при 180 °С и 1500 мин
306	4	240	100	0,070	0,09	68,8	2,1	84	$0,92 \cdot 10^{-8}$	Чистая поверхность	Заметное сниже- ние с ростом ско- рости. Медлен- ное нарастание T_m
214	6	160	180	0,052	0,10	3,2	2,3	3,86	$0,04 \cdot 10^{-8}$	Темные полосы	Тенденция к снижению с рос- том температуры
213	6	240	160	0,070	0,087	0,6	3,0	1	$1,10 \cdot 10^{-8}$	Темные полосы	
508	8	240	130	0,042	0,095	3,7	2,4	4,87	$0,05 \cdot 10^{-8}$	Небольшие темные полосы, есть задиры	
503	8	160	180	0,030	0,070	15,1	0,4	19,9	$0,20 \cdot 10^{-8}$	Темные полосы	Скачки до $0,25$ при 700 мин^{-1} и T_m до 180 °С
603	10	240	190	0,060	0,095	1,4	1,3	1,83	$0,02 \cdot 10^{-8}$	Темные полосы, буртик	

Анализ приведенных данных показывает, что наиболее стабильным в рабочем интервале температур является коэффициент трения f сплава АК7М6 с добавкой 6 % Pb ($p_n = 240$ МПа). Поэтому этот сплав может рассматриваться как перспективный с точки зрения использования в качестве материала для подшипников скольже-

ния. При этом затвердевание отливок должно осуществляться под давлением свыше 200 МПа.

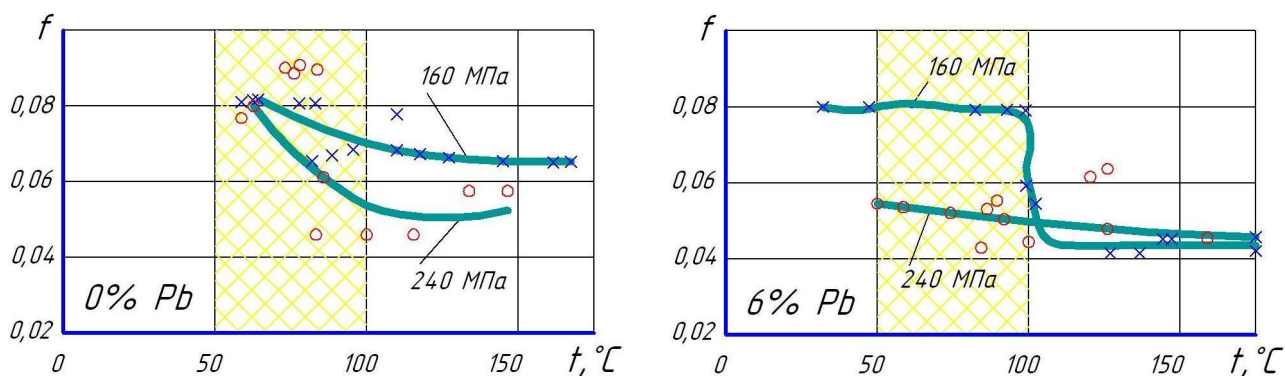


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента трения образцов из сплава АК7М6 без добавки и с добавкой 6 % Pb от температуры поверхности трения

На основе проведенных исследований рекомендуются следующие составы антифрикционных алюминиевых сплавов для деталей пар трения гидроаппаратуры.

Сплав А, содержащий в % (мас.): Si 6,5...7,5; Cu 5,5...6,5; Pb 0,0...6,0; Fe до 0,8; Mg до 0,3; Al и примеси – остальное.

Сплав Б, содержащий в % (мас.): Si 2,5...4,0; Cu 5,5...7,0; Pb 1,0...7,0; Fe до 0,5; Mg до 0,35; Al и примеси – остальное (патент РФ № 2226569).

Пятая глава посвящена разработке и внедрению в производство технологии ЛКД заготовок деталей шестерённых насосов – компенсаторов и втулок.

Деталь «Компенсатор» (рисунок 8) является составной частью шестерённого насоса. Она сопрягается плоской торцевой поверхностью с вращающимися стальными шестернями, а ее боковые поверхности с уплотнением прилегают к стенкам внутренней полости корпуса насоса. Компенсатор ранее изготавливали методом порошковой металлургии из медного порошка или литьем в кокиль из бронзы БрО5Ц5С5.

Разработана технология ЛКД заготовок компенсаторов из медистого силумина АК7М6. Отливка имеет форму «восьмерки» с двумя центральными отверстиями. На плоской торцевой поверхности выполнены канавки, на противоположной поверхности – буртик для фиксации резинового уплотнения. Боковая поверхность отливки имеет сложную конфигурацию и механической обработке не подвергается; размеры этой поверхности имеют допуск, обеспечивающий сборку шестерённого насоса.

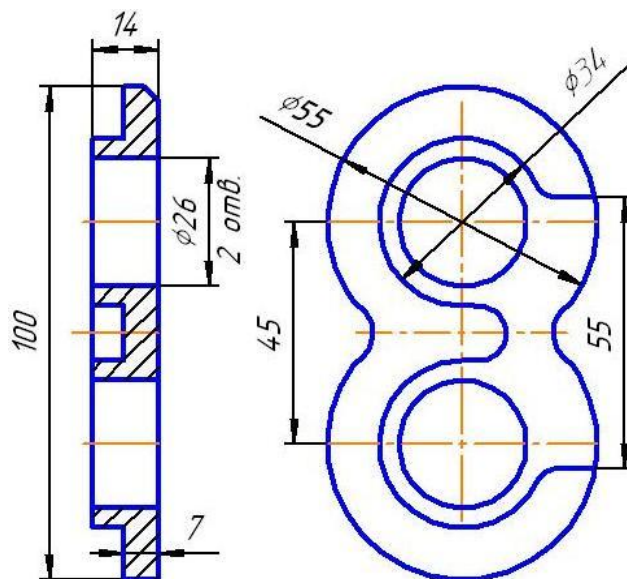


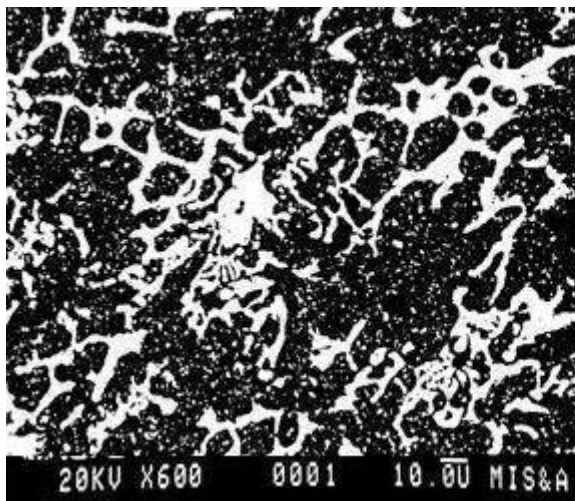
Рисунок 8 – Отливка «Компенсатор»

Опробованы три схемы прессования формирующейся отливки – пуансонно-поршневое, пуансонное и поршневое. По результатам исследований для практического внедрения было принято пуансонное прессование.

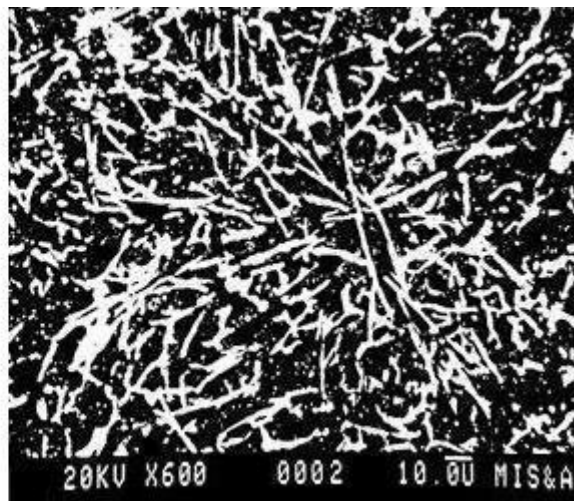
Изучены структура и механические свойства компенсаторов, изготовленных ЛКД из сплава следующего состава (в мас. %): Si 7,2; Cu 6,3; Mg 0,1; Mn 0,28; Fe 0,9; Zn 0,2; Ni 0,08; Al остальное. Структура отливки приведена на рисунке 9, а. Механические свойства этих отливок следующие: $\sigma_b = 180...187$ МПа; $\delta = 2,7...2,9$ %; твердость 110...115 НВ.

Микроструктура отливки, полученной литьем под давлением из сплава следующего состава (в мас. %): Si 5,5; Cu 5,6; Mg 0,13; Mn 0,16; Fe 0,73; Zn 0,20; Ni 0,12; Pb 0,01; Al и примеси остальное, характеризуется наличием тех же структурных и фазовых составляющих (рисунок 9, б), что и структура отливок, изготовленных ЛКД. Следует отметить, что выделения β -фазы ($FeSiAl_5$) имеют форму светлых игл. Свойства отливок, изготовленных литьем под давлением: $\sigma_b = 164...172$ МПа, $\delta = 1,9...2,8$ %; твердость 98...100 НВ.

Сравнение микроструктур отливок из медистых силуминов показало, что микроструктура отливок, изготовленных ЛКД, имеет более благоприятную форму, чем микроструктура отливок, изготовленных литьем под давлением, и более высокие механические свойства.



a)

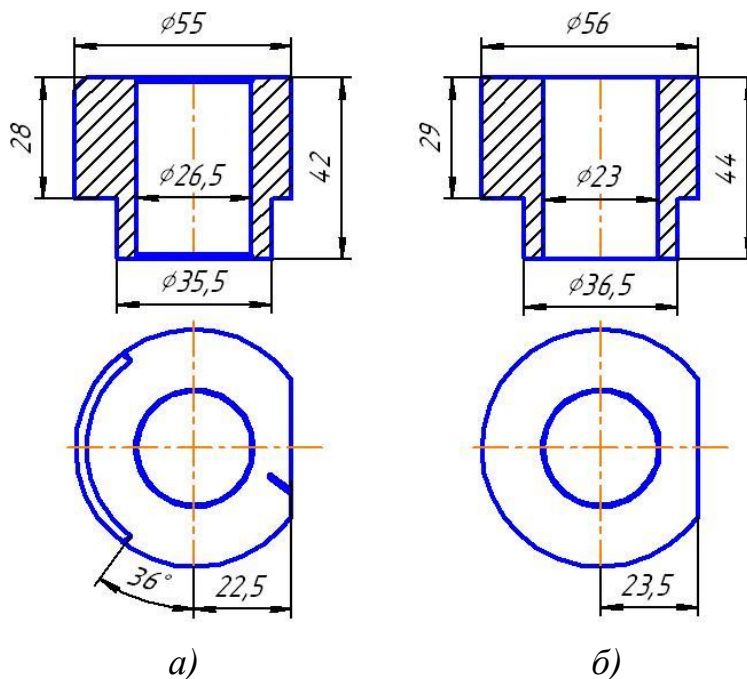


б)

Рисунок 9 – Микроструктура литых компенсаторов, изготовленных ЛКД (a) и литьем под давлением (б) (СЭМ)

Рекомендуемые технологические режимы ЛКД при изготовлении компенсаторов: $t_{\text{зал}} = 690 \dots 730 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{ф}} = 180 \dots 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$; давление прессования $p_{\text{н}} = 160 \dots 180 \text{ МПа}$; время от окончания заливки расплава в матрицу до момента приложения давления $\tau_{\text{д}} \leq 3 \text{ с}$; время выдержки формирующейся отливки под давлением $\tau_{\text{п}} = 8 \dots 10 \text{ с}$.

На рисунке 10 приведены чертежи детали «Втулка» (a) и отливки (б).



a)

б)

Рисунок 10 – Чертеж детали (a) и отливки (б) «Втулка»

Однородная структура, необходимые прочность и твердость отливок были достигнуты при следующих режимах ЛКД: $t_{\text{зал}} = 680 \dots 720 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{ф}} = 180 \dots 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $p_{\text{н}} = 160 \dots 240 \text{ МПа}$, $\tau_{\text{д}} \leq 3 \text{ с}$, $\tau_{\text{п}} = 12 \dots 20 \text{ с}$.

Замена литья в кокиль ЛКД позволяет уменьшить массу отливки «Втулка» (при использовании односторонней пресс-формы) на 0,05 кг, полностью устранить литники и приливы и дополнительно сэкономить на одной заготовке 0,11 кг.

Технология ЛКД заготовок компенсаторов и втулок шестерённых насосов освоена ОАО «Гидромаш» (Московская обл.), где организован промышленный участок ЛКД.

Использование отливок, изготовленных ЛКД, для подшипников скольжения и компенсаторов торцевого уплотнения обеспечило высокие механические свойства деталей и низкий коэффициент трения скольжения между алюминиевыми и стальными деталями.

В ОАО «Гидромаш» изготовлены шестерённые насосы, в которых были использованы компенсаторы и подшипники скольжения (втулки) из сплава АК7М6 с добавкой 6 % Pb, полученные способом ЛКД. В дальнейшем насосы были подвергнуты испытаниям при давлениях 16, 20 и 25 МПа на частотах вращения $n = 40$ и 50 с^{-1} (2400 и 3000 об/мин) с целью выявления способности материала втулок и компенсаторов выдерживать нагрузки на критических режимах.

Подшипники скольжения (втулки) и компенсаторы выдержали ужесточенный режим обкатки насосов НШ32 на каждом этапе до рабочего давления 25 МПа, что соответствует режиму работы насоса пятого исполнения по давлению (ОСТ 23.1.92-88). В таблице 3 приведены технические характеристики шестерённых насосов НШ-32, изготовленных разными предприятиями.

Таблица 3 – Сравнительные технические характеристики шестерённых насосов

Показатели	Насосы НШ 32 фирм стран СНГ	Насосы НШ32 ведущих фирм мира	Насосы НШ32 ОАО «ГИДРОМАШ»
Рабочая среда	Моторные масла вязкостью 40...70 сСт	Гидравлические всесезонные жидкости	
Давление нагнетания, МПа: – рабочее – максимальное	21,0 25,0	25,0 28,0	28,0 32,0
Максимальная частота вращения вала гидронасоса, об/мин	3000	3500	6000
Коэффициент подачи при 25 МПа	0,90	0,95	0,97
Удельная материалоемкость, кг/кВт	0,25-0,40	0,20-0,25	0,15-0,20
Полный ресурс, моточасы	6000	12000	24000

Анализ характеристик показывает, что насосы НШ-32, произведенные ОАО «Гидромаш» с использованием втулок и компенсаторов, изготовленных методом ЛКД, по всем основным параметрам превосходят насосы, выпускаемые ведущими фирмами стран СНГ и мира.

Произведена оценка экономической эффективности внедрения технологии ЛКД. Устранение литников и прибылей, замена сплава позволили уменьшить толщину отливки «Компенсатор» (в 2 раза), массу (в 5 раз) и снизить массу насоса на 0,57 кг. При этом стоимость отливки уменьшилась с 120 до 15 руб. Таким образом, ежегодная экономия на стоимости используемого материала при работе участка ЛКД на заводе ОАО «Гидромаш» составляла более 25 млн. руб.

Использовании насосов пятого исполнения (с подшипниками и втулками, изготовленными с использованием технологии ЛКД) в гидросистемах мобильных машин позволило отказаться от экологически вредных и дорогостоящих сезонных моторных масел М8Г2 и М10Г2 в пользу менее опасных всесезонных промышленных масел И-20 без необходимости сезонной замены, что привело к экономии от 1600 до 5800 руб. в год на одном тракторе.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработаны литейные антифрикционные сплавы на основе системы Al-Si-Cu-Pb, состав одного из которых защищен патентом РФ №2226569.

2. Для изготовления отливок из этих сплавов выбран способ литья с кристаллизацией под давлением. На основе исследований рекомендуются следующие технологические режимы литья: температура заливки – 680...730 °С; температура матрицы пресс-формы – 180...200 °С; давление прессования – 160...240 МПа; время выдержки расплава в матрице до приложения давления – минимальное (не более 3 с) и под давлением из расчета 1 с на 1 мм толщины стенки отливки.

3. Закономерности затвердевания и уплотнения отливок из антифрикционных алюминиевых сплавов аналогичны закономерностям затвердевания и уплотнения отливок из других сплавов цветных металлов в условиях ЛКД. Они свидетельствуют о том, что с повышением давления прессования уменьшается время затвердевания

отливок, увеличивается перепад температур по сечению отливки и уменьшается перепад температур на границе раздела «отливка – пресс-форма».

4. Добавка свинца в медистые силумины не изменяет характера затвердевания отливания отливок, способствует уменьшению времени затвердевания и повышению коэффициента затвердевания.

5. Увеличение добавки свинца до 10 % (по массе) в медистые силумины практически не влияет на величину литейной усадки отливок при ЛКД, приводит к незначительному укрупнению структуры и снижению прочностных характеристик (примерно на 10 %), повышает склонность сплавов к обратной ликвации.

6. Коэффициент усвоения свинца в сплавах и отливках при ЛКД, зависящий от условий приготовления расплава и величины давления прессования, возрастает после ввода свинца под слой рафинирующе-модифицирующего флюса и при уменьшении давления при кристаллизации.

7. Рекомендуемая величина добавки свинца в медистые силумины составляет 4...6 % (по массе), что обеспечивает наибольшие показатели прочностных и наилучшие – фрикционных и износостойких характеристик. Коэффициент трения отливок, изготовленных ЛКД из таких сплавов, в паре трения со сталью 95Х18 (с 60 HRC) находится в пределах 0,040...0,065.

8. Разработана технология производства отливок для деталей «Компенсатор» и «Втулка» способом ЛКД, включая конструкции пресс-форм и технологические режимы литья и прессования. Технология ЛКД внедрена в производство на ОАО «Гидромаш».

9. Себестоимость материала отливки «Компенсатор» сократилась с 120 до 12 руб. За 15 лет работы литейного участка ОАО «Гидромаш» при выпуске более 1,5 млн. отливок «Компенсатор» экономия на материале составила свыше 500 тонн бронзы или более 10 млн. руб. в год.

10. Шестерённые насосы с деталями из новых антифрикционных сплавов, изготовленными ЛКД, по основным техническим показателям превосходят аналогичные насосы производства стран СНГ с антифрикционными комплектующими, изготовленными по традиционной технологии и из традиционных материалов.

11. Разработаны насосы с номинальным рабочим объемом более 25 см³/об и давлением нагнетания 28...32 МПа, превосходящие по техническим характеристикам лучшие мировые аналоги. Конструкции насосов защищены 12 патентами РФ.

12. Использование в гидросистемах мобильных машин всесезонных промышленных масел без необходимости сезонной замены позволяет экономить до 5,8 тыс. руб. в год на одном тракторе.

Основные публикации по теме диссертационной работы

1. Батышев А.И., Батышев К.А., Георгиевский М.Г. Ликвация свинца в отливках из медистых силуминов // МГОУ – XXI – Новые технологии, 2005, №5. – С. 29-32.

2. Георгиевский Г.М., Георгиевский М.Г., Батышев А.И., Батышев К.А. Многосекционные шестерённые насосы моноблочной компоновки // МГОУ – XXI – Новые технологии, 2006, №2. – С. 27-29.

3. Батышев А.И., Батышев К.А., Георгиевский Г.М., Георгиевский М.Г. Литейные медистые силумины, легированные свинцом // Сборник докладов «Металлургия легких металлов. Проблемы и перспективы». 11-я Международная научно-практическая конференция, МИСиС, 20-22 ноября 2006 г. – Москва, 2006. – С. 216-218.

4. Батышев А.И., Батышев К.А., Георгиевский Г.М., Георгиевский М.Г. Эволюция шестерённых насосов // МГОУ – XXI – Новые технологии, 2007, №5. С. 33-36.

5. Батышев А.И., Батышев К.А., Гольцова С.В., Георгиевский М.Г. Ликвация свинца в отливках из алюминиевых сплавов // Литейное производство, 2007, № 12. – С. 2-4.

6. Георгиевский М.Г., Батышев К.А. Литье компенсаторов для шестерённых насосов / Сборник докладов «Прогрессивные литейные технологии». 4-я Международная научно-практическая конференция, МИСиС, 22-28 октября 2007, Москва. – С. 120-122.

7. Георгиевский М.Г., Батышев А.И. Литье с кристаллизацией под давлением заготовок компенсаторов шестерённых насосов / Новые материалы, прогрессивные технологические процессы и управление качеством в заготовительном производстве. Материалы Российской научно-технической конференции. Т.1. – Рыбинск, 2007. – С. 37-39.

8. Георгиевский Г.М., Георгиевский М.Г., Батышев А.И., Батышев К.А. Совершенствование конструкций шестерённых насосов // Технология машиностроения, 2008, №2. – С. 45-48.

9. Батышев К.А., Безпалько В.И., Георгиевский М.Г. Изготовление отливок из антифрикционных алюминиевых сплавов / Труды 6-й международной научно-

практической конференции «Прогрессивные литейные технологии», МИСиС, 24-28 октября 2011, – Москва, 2011. – С. 79-80.

10. Батышев А.И., Батышев К.А., Безпалько В.И., Смолькин А.А., Гольцова С.В., Георгиевский М.Г. Усадка отливок, изготовленных литьем с кристаллизацией под давлением / В сб. «Теория и практика литейных процессов». Тр. Всероссийской научно-практической конференции 13-15 июня 2012 г. – Новокузнецк, 2012. – С. 114-118.

11. Георгиевский М.Г., Батышев К.А. О возможности использования новых типов шестерённых насосов в нефтедобыче // МГОУ – XXI – Новые технологии, 2012, №5-6 – С. 9-10.

12. Георгиевский М.Г., Батышев К.А. Шестерённые насосы нового типа и литьё с кристаллизацией под давлением // Литейное производство, 2013, №7 – С. 29-30.

13. Патент РФ №2226569. Литейный антифрикционный сплав на основе алюминия / Георгиевский М.Г., Васин В.А., Сомов О.В. – Б.И., 2004, №10.

14. Патент РФ №46058. Насос для перекачки нефтепродуктов / Георгиевский М.Г., Георгиевский Г.М., Ковецкий В.И., Смирнов С.М., Шерстнев А.Е., Шашин Н.А. – Б.И., 2005, №16.

15. Патент РФ №46313. Насос гидроусилителя руля / Георгиевский М.Г., Георгиевский Г.М., Смирнов С.М., Шерстнев А.Е., Шашин Н.А. – Б.И., 2005, №18.

16. Патент №46314. Шестерённый насос гидроусилителя руля грузовых автомобилей и автобусов / Георгиевский М.Г., Георгиевский Г.М., Смирнов С.М., Шерстнев А.Е., Шашин Н.А. – Б.И., 2005, №18.

17. Патент РФ №2275532. Насос для перекачки нефтепродуктов / Георгиевский М.Г., Георгиевский Г.М., Смирнов С.М., Шерстнев А.Е., Шашин Н.А. – Б.И., 2006, №12.

18. Патент РФ №2300019. Способ перекачки несмазывающей жидкости шестерённым насосом / Георгиевский М.Г., Георгиевский Г.М. – Б.И., 2007, №15.

19. Патент РФ №2365787. Шестерённая гидромашина (варианты) / Георгиевский М.Г., Батышев К.А., Георгиевский Г.М. – Б.И., 2009, №24.

20. Патент РФ №2380573. Шестерённый насос / Георгиевский М.Г., Георгиевский Г.М. – Б.И., 2010, №3.

21. Патент РФ №2380574. Шестерённая гидромашина / Георгиевский М.Г., Георгиевский Г.М. – Б.И., 2010, №3.

22. Патент РФ №102702. Шестерённая гидромашина / Георгиевский М.Г., Георгиевский Р.Г., Георгиевский Г.М. – Б.И., 2011, №7.

23. Патент РФ №105231. Гидравлическое сцепление / Георгиевский М.Г., Георгиевский Р.Г., Георгиевский Г.М. – Б.И., 2011, №16.

24. Патент РФ №2448272. Шестерённая гидромашина / Георгиевский М.Г., Георгиевский Р.Г., Георгиевский Г.М. – Б.И., 2012, №11.