

На правах рукописи



ХИЛКОВ ДМИТРИЙ ЭДУАРДОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ШЛИКЕРА НА  
ОСНОВЕ СТАЛИ 40ХМА ПРИ ЛИТЬЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ И  
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМ**

Специальность 2.6.3 – Литейное производство

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва, 2021г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) на кафедре «Литейные технологии»

Научный руководитель: **-Коротченко Андрей Юрьевич,**  
доктор технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Официальные оппоненты: **-Дибров Иван Андреевич,**  
доктор технических наук, профессор, президент Российской ассоциации литейщиков, г. Москва.

**-Буданов Евгений Николаевич,**  
кандидат технических наук, ЗАО «Научно-Технический Центр «Автотекс», генеральный директор, г. Москва.

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения» (АО «НПО «ЦНИИТМАШ»), г. Москва.

Защита диссертации состоится «24» ноября 2021 в 16 часов 00 мин. на заседании диссертационного Совета 24.2.327.05 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 121552, г. Москва, ул. Оршанская, д.3, аудитория № 523А.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета и по электронной почте [paltievichar@mai.ru](mailto:paltievichar@mai.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте <https://mai.ru/events/defence/>.

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
24.2.327.05, к.т.н., доцент



Палтиевич А.Р.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Развитие литейного производства связано как с внедрением новых технологий, так и с модернизацией традиционных способов литья. Путей модернизации много, среди которых можно выделить придание существующим литейным сплавам новых свойств, которые позволяют существенно повысить эксплуатационные свойства литых заготовок. Для модернизации технологий производства и улучшения свойств отливок часто используют подход синтезирования разных направлений.

Этот подход привел к созданию нового направления PIM (Powder Injection Molding) – литье под давлением термопластичных шликеров (ПИМ-технология). Данная технология разделяется на два больших направления по используемым материалам на основе керамического CIM (Ceramic Injection Moulding) и металлического MIM (Metal Injection Molding) порошка. Преимущество шликерного литья состоит в возможности получить равно плотные по объему изделия сложной формы. Для придания порошкам способности приобретать заданную форму, плотность и прочность в процессе формования, а также для сохранения прочности сформованных заготовок вплоть до спекания вводятся временные связки. Шликер содержит твёрдую фазу – порошок, жидкую фазу – временную связку и добавки, улучшающие его свойства.

В рамках диссертационной работы рассмотрена МИМ-технология – литье под давлением термопластичных шликеров. Это отдельная ветвь технологического процесса ПИМ-технологии получения металлических изделий способом литья под давлением термопластичного шликера на основе металлического порошка, где в качестве временной связки металлического порошка являются термопласты, и жидкая фаза при нормальных условиях отсутствует.

При заполнении полости пресс-формы машин литья под давлением (ЛПД) термопластичный шликер содержит высокую долю твердой фазы и обладает тиксотропными свойствами (вязкость расплава зависит от величины скоростей сдвига). Еще одна особенность МИМ-технологии – это поэтапный процесс получения готового изделия. Сначала литьем под давлением на термопластавтомате путем расплавления термопластичного шликера формируется отливка, затем из отливки удаляют полимерный компонент, выполняющий роль связки металлического порошка. Далее происходит окончательное формирование детали, путем спекания порошка. Это дает возможность получать литьем под давлением литые заготовки из высокотемпературных сплавов, таких как различные марки сталей, титан, вольфрам и другие. Связано это с тем, что температура шликера при ЛПД не превышает нескольких сот градусов и поэтому рабочий ресурс пресс-форм не снижается.

Однако при получении литых заготовок по МИМ-технологии возникают и новые проблемы. Вязкость термопластичного шликера на несколько порядков превышает вязкость традиционных литейных сплавов. Поэтому к машинам ли-

тля под давлением термопластичных шликеров (термопластавтоматов) предъявляются повышенные требования к рабочим параметрам и режимам литья. Давление прессования может достигать до 3000 атмосфер, а из-за наличия абразивных частиц в шликере в виде металлического порошка, стенки материального цилиндра и шнек подвергаются специальной обработке, чтобы обладать повышенной сопротивляемостью износу.

Кроме этого, высокая вязкость шликера может приводить к возникновению струйного течения в рабочей полости пресс-формы, что увеличивает риск захвата воздуха и образованию в отливках газовых дефектов, а также к появлению несплошностей при слиянии потоков.

Поэтому задачи получения бездефектных отливок при литье под давлением за счет уточнения параметров и конструкции литниковой системы, связанных с тиксотропными свойствами шликера, и устранение струйного течения за счет выбора рациональных режимов прессования являются весьма актуальными.

В связи с вышеизложенным, актуальна задача исследования процессов, происходящих при заполнении расплавом с тиксотропными свойствами полости пресс-формы и разработка рекомендаций расчета литниковых систем, обеспечивающих снижение возникновения несплошностей в литых заготовках.

**Цель работы** – исследование особенностей литья под давлением термопластичных шликеров с тиксотропными свойствами и разработка рекомендаций по выбору параметров литниковых систем с целью устранения дефектов поверхности и геометрии литых заготовок.

**Основные задачи диссертации:**

1. Разработать состав термопластичного шликера на основе стали 40ХМА из отечественных компонентов, определить физические и технологические свойства нового термопластичного шликера;
2. Определить параметры реологической модели для описания течения термопластичного шликера.
3. Разработать методику расчета литниковых систем для литья под давлением термопластичных шликеров.

**Основные положения, которые выносятся на защиту:**

1. Применение разработанной методики расчета параметров литниковых систем, учитывающей особенности реологических свойств термопластичного шликера, позволяет уменьшить количество поверхностных дефектов и несплошностей в отливке и повысить качество отливок.
2. Предложенная реологическая модель и установленные параметры этой модели для описания упруго-вязко-пластических свойств термопластичного шликера обеспечивают применимость разработанных методов снижения образования дефектов на этапе заполнения литниковой системы и формообразующей полости.

### **Научная новизна:**

1. На основании регрессионного анализа обоснован выбор реологической модели течения в пресс-форме литья под давлением термопластичного шликера с увеличенным размером частиц порошка стали 40ХМА и разработана методика расчета рациональных параметров режимов прессования.

2. Установлена зависимость величины вязкости расплава термопластичного шликера с увеличенным размером частиц порошка стали 40ХМА от конфигурации элементов литниковой системы при его течении в пресс-форме литья под давлением. Доказано, что снижение вязкости расплава позволяет уменьшить количество поверхностных дефектов и несплошностей в отливке.

3. На основании термодинамических расчетов определены условия снижения образования поверхностных дефектов и несплошностей в отливке, основанные на комплексной оценке образования струйного течения, снижения вязкости и выбора места подвода расплава к отливке.

4. Разработана методика расчета рациональных параметров элементов литниковой системы для получения литой заготовки из термопластичного шликера с увеличенным размером частиц порошка стали 40ХМА методом литья под давлением.

### **Теоретическая и практическая значимость исследования**

1. Разработан состав термопластичного шликера на основе металлического порошка фракцией до 60 мкм и полимерных связующих: полиацетала и полиэтилена высокого давления.

2. Разработана методика расчета параметров реологической модели, обеспечивающая математическое моделирование течения термопластичных шликеров с тиксотропными свойствами, результаты которого коррелируются с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований.

3. Разработана методика расчета элементов литниковой системы для литья под давлением термопластичных шликеров, обеспечивающая снижение образования поверхностных дефектов и несплошностей в отливке.

Внедрение результатов диссертационной работы на предприятии АО «ИНСТИТУТ ПЛАСТМАСС» ИМ. Г.С.ПЕТРОВА позволило получить литые заготовки и образцы для механических испытаний из разработанных материалов с тиксотропными свойствами на основе металлического порошка фракцией до 60 мкм и полимерных связующих полиацеталь (ПОМ) и полиэтилен высокого давления (ПВД).

Разработанные методики выбора параметров литниковых систем позволили на предприятии АО «Сумитомо (СХИ) Демаг Пластикс Машинери» получать отливки из шликеров без дефектов и обеспечить равномерное распределение плотности изделия.

Использование указанных результатов позволяет сократить сроки отработки техпроцесса изготовления отливок и добиться их заданных служебных свойств.

### **Методология и методы диссертационного исследования.**

Методологическую основу исследования составили научные труды отечественных и зарубежных ученых в литье термопластичных шликеров. Информационные источники научного исследования:

- научные источники в виде данных и сведений из книг, журнальных статей, научных докладов, материалов научно-технических конференций;
- официальные документы: положения и ГОСТ;
- результаты собственных расчетов и проведенных экспериментов.

В работе также использовалось:

- пакет программ FLOW-3D для компьютерного моделирования литейных процессов;
- термопластавтомат witman battenfeeld/smart power 50 для исследования режимов литья под давлением;
- Advanced Capillary Rheometer RH10 оборудование для определения вязкости от скорости сдвига для термопластичных шликеров;
- определение химического состава порошка с помощью Olympys Vanta Series C;
- исследование частиц металлического порошка с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCANVEGA3;
- универсальная электромеханическая разрывная машина марки FP-10 для исследования прочностных характеристик;
- лабораторный смеситель для изготовления термопластичного шликера;
- установка ИИРТ-5м для определения показателя текучести расплава;
- микротвердомер Emco-test Durascan для измерения микротвердости полученной детали;
- портативный профилометр Surtronic 128 для измерения шероховатости полученной детали;
- шлифовально-полировальная система подготовки образцов Tegamin-25, Struers для исследования микроструктуры полученных образцов;
- томограф Phoenix GE VX M300 для исследования скрытых дефектов в отливке.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается использованием современных методов исследований, анализа и статистической обработки экспериментальных данных, подтвержденных сравнительным анализом численных и натуральных экспериментов, а также практическим использованием результатов при разработке технологических процессов.

**Личный вклад** соискателя выражается в планировании, организации и проведении экспериментальных исследований, обработке, анализе и интерпретации полученных результатов.

### **Апробация работы.**

Основные материалы диссертационной работы обсуждались на конференции «Инновационные литейные технологии для эффективного производ-

ства», Россия 2017 ЛИТМАШ, Международная выставка литейных технологий и материалов. (ЦВК «Экспоцентр», г. Москва, 05-07 июня 2017 г.), X Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроение России» (Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 27 -30 сентября 2017 г.), Научно-техническая конференция «Технологии специального приборостроения. Молодежь в науке-2018» (Производственное объединение «Старт им. Проценко», предприятие госкорпорации «РОСАТОМ» г. Заречный, с 28 февраля по 1 марта 2018 г.), XI Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроение России» (Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 24 -27 сентября 2018 г.), XII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроение России» (Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 25 -28 сентября 2019 г.).

### Публикации.

По теме диссертации автором опубликовано 13 научных работ, в том числе 5 работ [1–5] в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, 3 работы [6-8] в изданиях, индексируемых в международных системах цитирования Scopus, 5 - опубликовано в сборниках научных конференций [9-13].

### Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов, списка сокращений и условных обозначений, библиографического списка из 112 наименований и приложений. Она изложена на 138 страницах машинописного текста, содержит 27 таблиц и 95 рисунков.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** кратко описываются особенности литья под давлением термопластичных шликеров (МИМ-технологии). Обосновывается актуальность решаемой научно-технической проблемы снижения несплошностей в литых заготовках из термопластичного шликера с тиксотропными свойствами. Формулируется цель и ставятся задачи исследований, излагается научная новизна и практическая ценность работы, формулируются основные положения и результаты, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведен литературный обзор состава термопластичного шликера и параметров компонентов с реологическими свойствами. Подробно описано влияние гранулометрического состава и формы металлического порошка, который является основным компонентом термопластичного шликера, влияющие на реологические свойства. Рассмотрены составы связующих компонентов и их свойства.

Приведена классификация дефектов отливок из термопластичного шликера. Показаны возможные причины их возникновения, связанные с особенностью течения термопластичного шликера в процессе заполнения полости пресс-формы.

Рассмотрены конструктивные особенности и состав литниковых систем для литья термопластов. Показаны существующие методики расчета элементов литниковых систем для термопластов и места подвода расплава к отливке.

Приведены способы определения вязкости термопластичного шликера и сделан анализ реологических моделей для описания характера его течения при механическом нагружении в процессе литья под давлением.

**Во второй главе** показана технология получения термопластичного шликера, приведены результаты экспериментальных исследований компонентов и реологических свойств разработанного термопластичного шликера. Приведены методики исследования, подобрана реологическая модель и рассчитаны её параметры.

Для изготовления термопластичного шликера была выбрана конструкционная легированная сталь 40ХМА, в таблице 1 представлен химический состав.

Таблица 1 – Химический состав металлического порошка 40ХМА

| Материал | C, % | Cr, % | Mo, % | Fe, %  |
|----------|------|-------|-------|--------|
| 40ХМА    | 0,41 | 1,28  | 0,28  | Баланс |

Выбор именно этой марки стали обусловлен областью ее применения. Сталь 40ХМА используется для изготовления ответственных деталей общего назначения в машиностроении (в том числе, в оборонной промышленности). Типовые изделия оружейной промышленности, которые изготавливаются из стали 40ХМА: курок, мушка, шептало, целик и многие другие. Объемы потребления подобных изделий до 100 тыс/шт в месяц. Основные потребители данной продукции: Калашников, Тульский завод, завод имени Дегтярева и другие.

Металлический порошок характеризуется двумя основными параметрами размером и формой. Для МИМ-технологии принято использовать порошок до 22 мкм, что позволяет получать детали с минимальной толщиной стенки 500 мкм.

В работе предложена методика выбора максимального размера порошка в зависимости от минимальной толщины стенки детали, что позволит использовать порошки более крупной фракции, тем самым снизив её себестоимость. В основу методики положено сохранение коэффициента плотности упаковки, который рассчитывается по формуле (1).

$$k = \frac{N \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3}{V_{яч}} \quad (1)$$

где  $k$ - коэффициент плотности упаковки;

$V_{яч}$  - объем элементарной ячейки;

$R$  - радиус сферического порошка;

$N$  - количество порошка в элементарной ячейке объема.

На рисунке 1 показана элементарная ячейка в гексагональной плотнейшей упаковке (ГПУ).

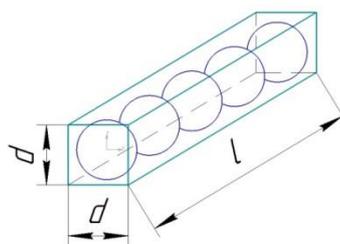


Рисунок 1 – Элементарная ячейка с металлическим порошком

Объем элементарной ячейки можно представить, как произведение  $d^2$  на  $l_{\min}$ . Тогда уравнение (1) можно преобразовать к виду (2):

$$l_{\min} = \frac{N \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot R^3}{d^2 \cdot k} \quad (2)$$

где  $l_{\min}$  - минимальная толщина стенки,

$d$  - диаметр частицы.

В качестве примера в таблице 2 приведены значения минимальной толщины стенки при соответствующей фракции порошка.

Таблица 2 – Зависимость минимальной толщины стенки отливки от размера порошка в термопластичном шликере.

| $d_{90}$ , мкм                  | 22  | 40  | 60   | 80   | 100  |
|---------------------------------|-----|-----|------|------|------|
| Минимальная толщина стенки, мкм | 500 | 910 | 1364 | 1819 | 2274 |

Большая номенклатура деталей из оружейной промышленности попадает в категорию с минимальной толщиной стенки 1 мм. Поэтому совместно с производителем «Полема» был произведен металлический порошок 40ХМА с фракциями  $d_{10} = 11$ ,  $d_{50} = 28$  и  $d_{90} = 48$  мкм, рисунок 2.

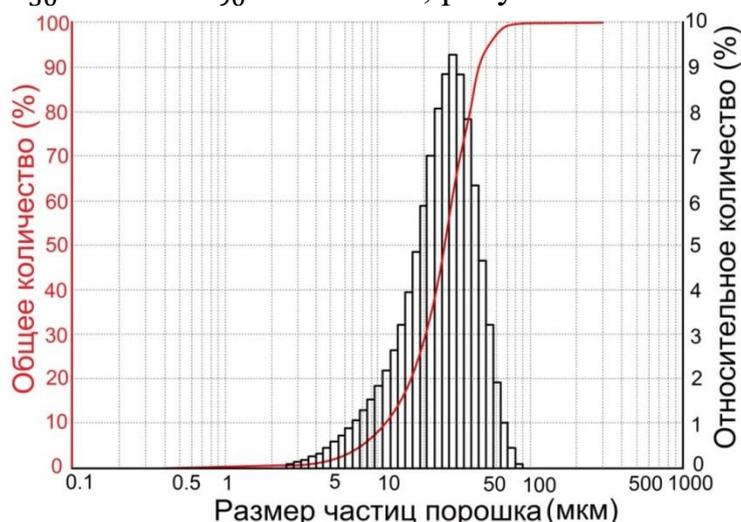


Рисунок 2 – Диаграмма гранулометрического состава порошка

Форма металлического порошка сферическая, что способствует улучшению реологических свойств металлической смеси (снижение вязкости). Вследствие чего можно увеличить содержание металлического порошка в смеси, снизить усадку и повысить размерную точность изготавливаемых изделий.

На основе рекомендаций BASF были выбраны связующие компоненты термопластичного шликера. В качестве основного компонента связующего был выбран полиацеталь или полиоксиметилен (ПОМ) КОСЕТALK700 производитель Kolon Plastics. В роли добавок использовали полиэтилен высокого давления (ПВД/LDPE) производства «Казаньоргсинтез» и стеариновую кислоту.

Термопластичный шликер состоит из 60% (по объему) из металлического порошка и 40% связующего. Связующее вещество состоит из 90% (по массе) полиацеталя и 10% полиэтилена высокого давления, доля стеариновой кислоты составляет 1% от общей массы ПОМ и ПВД.

На разрывной машине марки FP-10 исследованы прочностные характеристики образцов из термопластичного шликера 40ХМА. Форма и размеры образца, рисунок 3, для испытаний на растяжение приняты в соответствии с ISO 2740.

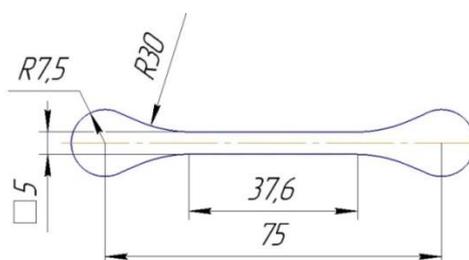


Рисунок 3 – Образец для исследования механических свойств

Методика испытаний на растяжение проводилась по ГОСТ 1497-84. На рисунке 4 показана схема и кривая нагружения.

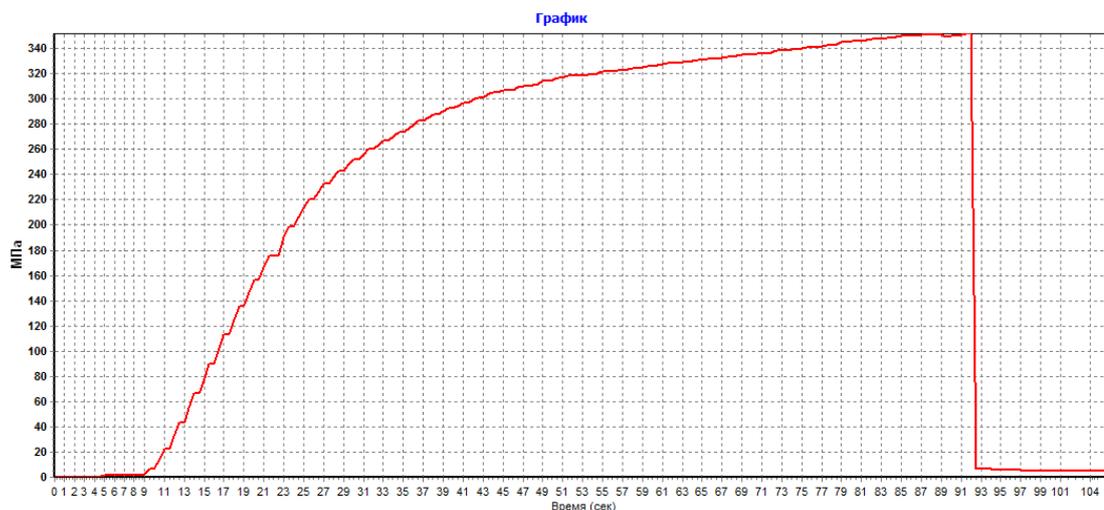


Рисунок 4 – Схема и кривая нагружения

Исследования показали, что предел прочности (временного сопротивления) образцов, изготовленных из термопластичного шликера 40ХМА, находится в диапазоне 360 – 400 МПа. Этот показатель соответствует требованиям образцов, полученных по МИМ-технологии заводом производителем BASF термопластичного шликера Catamold.

На установке ИИРТ-5м получены показатели текучести термопластичных шликеров с целью нахождения энергий активации шликеров, которая показы-

вает степень зависимости вязкости от температуры, рисунок 5. Чем больше значение энергии активации, тем более чувствителен материал к температуре.

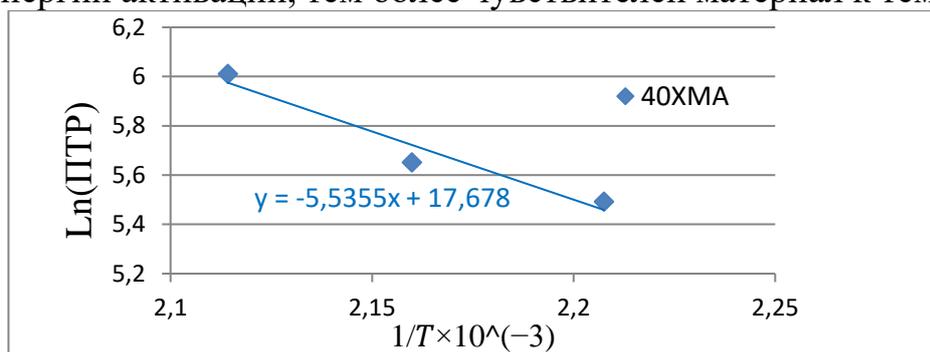


Рисунок 5 – ПТР при различных температурах

Энергия активации течения термопластичных шликеров определяется уравнением Аррениуса (3):

$$k(T) = A \cdot e^{-\frac{E_A}{RT}} \quad (3)$$

где  $E_A$  – энергия активации;

$R = 8,314 \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \right]$  – универсальная газовая постоянная;

$T$  – температура;

$A$  – предэкспоненциальный множитель.

Эксперименты показали, что термопластичный шликер 40ХМА имеет энергию активации 46 кДж\моль, что меньше энергии активации зарубежных аналогов. Поэтому небольшие колебания температуры в процессе формования изделия на ТПА не приведут к концентрации напряжений, трещин и искажений в отливаемой детали.

На капиллярном реометре Advanced Capillary Rheometer RH10 определены значения вязкости при разных скоростях сдвига. На рисунке 6 показана зависимость вязкости от скорости сдвига для термопластичного шликера 40ХМА.

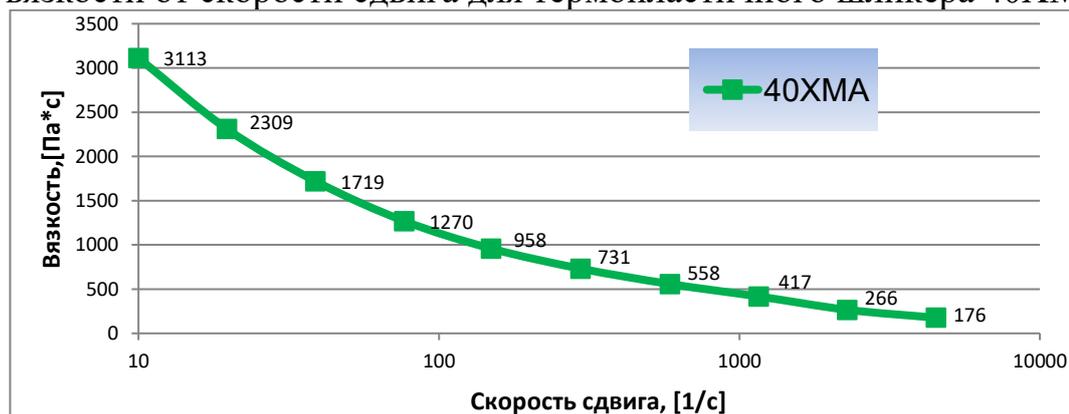


Рисунок 6 – Вязкость термопластичных шликеров от скорости сдвига

Термопластичный шликер 40ХМА можно отнести к неньютоновским жидкостям (напряжения сдвига не пропорциональны скоростям сдвига), обладающим свойством тиксотропии (вязкость уменьшается с увеличением скоростей сдвига).

Для описания этих особенностей рассмотрен целый ряд реологических моделей. Для каждой модели были рассчитаны коэффициенты уравнения с помощью метода наименьших квадратов и определены коэффициенты детерминации. Наименьшее отклонение для описания вязкости от скорости сдвига получилось у модели Карро и Яшида с поправочными коэффициентами (4).

$$\eta(\gamma) = \frac{\eta_0 \cdot E - \eta_\infty}{\lambda_{00} + [\lambda_0 + (\lambda_1 \cdot E)^2 \cdot \gamma^2]^{\frac{(1-n)}{2}}} + \frac{\lambda_2}{\sqrt{\gamma^2}}, \quad (4)$$

где  $\eta$  – эффективная вязкость, Па\*с;

$\gamma$  – скорость сдвига, с-1;

$\eta_0$  – наибольшая ньютоновская вязкость, Па\*с;

$\eta_\infty$  – наименьшая ньютоновская вязкость, Па\*с;

$\lambda_{00}, \lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$  – эмпирические постоянные;

$n$  – эмпирическая постоянная от 0 до 1;

$E$  – температурный коэффициент (5).

$$E = \exp \left[ a \cdot \left( \frac{T^*}{T-b} - c \right) \right], \quad (5)$$

где  $T^*$  – значение температуры, после которой начинается учет зависимости параметров модели от температуры, К;

$T$  – температура шликера, К;

$a, b$  и  $c$  – эмпирические постоянные.

Коэффициент детерминации  $R^2$  для модели Карро и Яшида с поправочными коэффициентами (6).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^k (y_i - \bar{y}_i)^2}, \quad (6)$$

$$R^2 = 1 - \frac{4441,0407}{8365092,1} = 0,99946$$

где  $k$  – количество точек эксперимента ( $k=10$ );

$y_i$  – экспериментальное значение вязкости (таблица 2.7);

$\hat{y}_i$  – значение вязкости, рассчитанное по модели Карро и Яшида (таблица 2.10);

$\bar{y}_i$  – среднее экспериментальное значение вязкости ( $\bar{y}_i=1151,7$ ).

**В третьей главе** сделана проверка реологической модели на адекватное описание течения термопластичного шликера. Показано влияние технологических факторов на течение термопластичного шликера по каналам литниковой системы. Разработана методика расчета литниковых систем для литья термопластичных шликеров.

Термопластичный шликер обладает упруго-вязко-пластическими свойствами, а для описания используется реологическая модель Бингама, рисунок 7 (7).

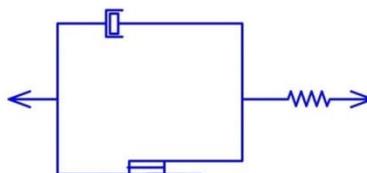


Рисунок 7 – Модель Бингама

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\tau}}{G} + \frac{\tau - \tau_0}{\eta_{пл}}, \quad (7)$$

где  $\dot{\gamma}$  – скорость деформации;  
 $G$  – модуль упругости;  
 $\dot{\tau}$  – напряжение сдвига;  
 $\tau_0$  – предельное напряжение сдвига;  
 $\eta_{пл}$  – пластическая вязкость.

Модель представляет собой соединенные параллельно элементы Ньютона и Сен-Венана-Кулона, к которым последовательно прикреплен элемент Гука. Из литературных источников были выбраны значения модуля сдвига равного  $2,9 \times 10^8$  Па и предела текучести  $6,53 \times 10^6$  Па, а значение вязкости изменяется согласно модели Карро-Яшида с поправочными коэффициентами.

Проверку на адекватность работы реологической модели проводили экспериментально и на точных решениях.

Для экспериментальной проверки был реализован процесс заполнения прозрачной формы свободной струей. На рисунке 8 показаны результаты экспериментального заполнения формы и результаты моделирования процесса заполнения формы в пакете программ Flow-3D, где для описания реологических свойств используется модель Бингама.

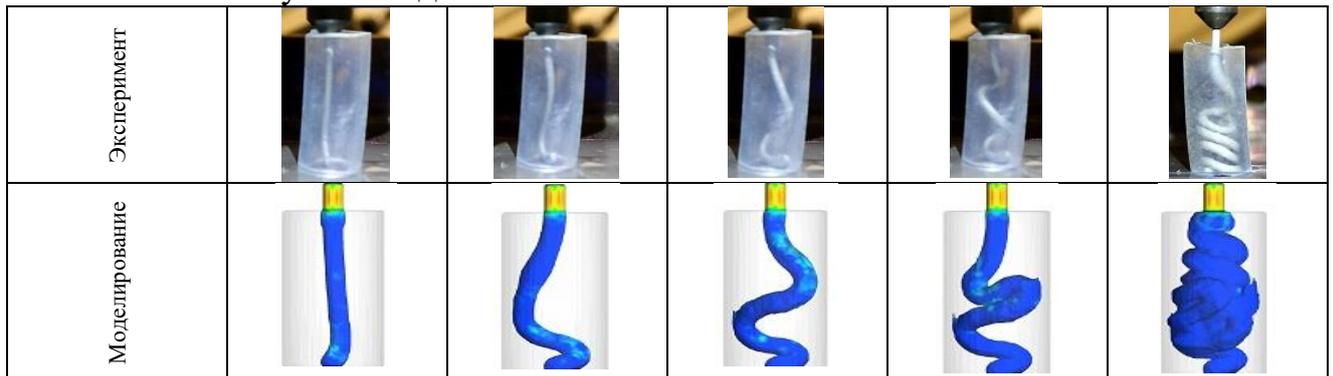


Рисунок 8 – Эксперимент и моделирование заполнения формы

Сравнив результаты расчетов с натурными испытаниями можно говорить о том, что в расчете адекватно воспроизводятся основные особенности струйного течения термопластичных шликеров в полости формы.

Для описания установившегося течение вязкой жидкости в каналах литниковой системы используется закон Гагена-Пуазейля (8).

$$Q = \frac{\pi \cdot \Delta p \cdot r^4}{8l\eta} \quad (8)$$

где  $\Delta p$  – перепад давления на концах трубы;  
 $r$  – радиус трубы;  
 $l$  – длина трубы;  
 $\eta$  – вязкость жидкости.

Для проверки реологической модели на точных решениях определили изменения давления при течении термопластичного шликера в каналах различной

длины по уравнению Гагена-Пуазейля и в пакете программ для моделирования Flow-3D, рисунок 9.

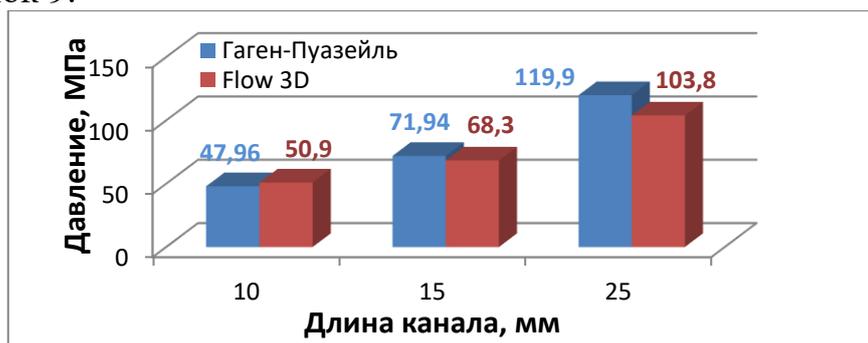


Рисунок 9 – Давление в каналах разной длины

Расчетные значения давления от значений моделирования отличаются незначительно, на длине каналов 10 и 15 мм менее 6%, а на длине 25 мм отличие на 13 %.

Разработана методика расчета рациональных параметров элементов литниковой системы. Как правило, литниковая система состоит из центрального литника, разводящих каналов и впускных литников. В процессе разработки конструкции литниковой системы следует предотвратить образование струйного течения в каналах, снизить вязкость шликера и обеспечить равномерный фронт потока без захвата воздуха.

При литье под давлением термопластичного шликера в центральном литнике высокая вероятность образования струйного течения, что приводит к захвату воздуха и образованию дефектов в отливке. Для выявления влияния расхода (скорость потока) при выходе из сопла из ТПА шликера и конусности центрального литника на величину струи проведен полнофакторный эксперимент и получена зависимость (9).

$$L_{\text{стр}} = 7,75 + \frac{1,85 \cdot (Q - 6.25)}{3,75} + \frac{2,75 \cdot (\alpha - 3)}{2} \quad (9)$$

где  $L_{\text{стр}}$  – длина струйного течения,

$Q$  – расход термопластичного шликера,

$\alpha$  – угол конуса в центральном литнике.

Струйное течение шликера увеличивается при расширении конуса или увеличении расхода. Поскольку увеличение конуса расширяет область пространства для струи, а больший расход придает потоку большую энергию на выходе. Поэтому для предотвращения образования струйного течения следует уменьшать конусность центрального литника и расход шликера на входе в центральный литник.

Так же для предотвращения струйного течения предложено несоосное расположение центрального литника и сопла термопластавтомата, рисунок 10.

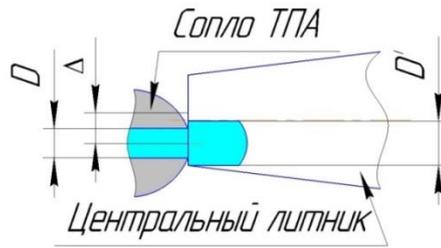


Рисунок 10 – Расположение сопла относительно центрального литника  
 При выходе из сопла, струя термопластичного шликера расширяется, согласно Барус-эффекту (10).

$$\frac{D'}{D} = \left[ 1 + \frac{(N_1/\sigma_{\max})}{8} \right]^{1/6} \quad (10)$$

где  $D'$  - диаметр струи после выхода из канала;  
 $D$  – диаметр сопла термопластавтомата;  
 $N_1$  – первая разность нормальных напряжений;  
 $\sigma_{\max}$  – максимальное напряжение сдвига.

Таким образом, при выходе из сопла струя шликера будет контактировать со стенкой центрального литника, образуя равномерный фронт потока.

При заполнение разводящего канала, термопластичным шликером с тиксотропными свойствами, разработана методика снижения вязкости за счет увеличения касательных напряжений в расплаве, что позволит улучшить заполнение узких сечений в отливке. Для оценки вязкости в разводящем канале используется методика Хернинга - Зипперера (11).

$$\eta_{\text{ш}} = \frac{\sum_1^n \eta_i \cdot x_i}{\sum_1^n x_i} \quad (11)$$

где  $n$  – количество значений вязкости в шликере;  
 $\eta_i, x_i$  – вязкость и молярная доля шликера с данной вязкостью.

В таблице 3 показаны рассчитанные значения вязкости в разводящих каналах с различной конфигурацией.

Таблица 3 – Распределение вязкости в каналах различной конфигурации

| Каналы и распределение вязкости | Вязкость, Па*с |
|---------------------------------|----------------|
|                                 | 1679,44        |
|                                 | 684,32         |

Средняя вязкость в прямолинейном канале в 2,5 раза больше, чем в канале с перегибом в 90°. На изменение вязкости в канале влияют два геометрических параметра: длина прямолинейного участка  $L$  и угла наклона  $\varphi$ , рисунок 11.

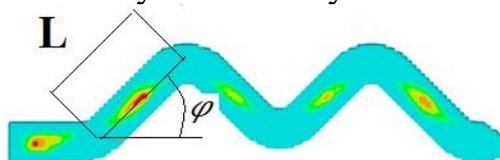


Рисунок 11 – Изогнутый канал

Для выявления влияния длины прямолинейных участков ( $L$ ) и угла наклона ( $\varphi$ ) на вязкость ( $\eta_{ш}$ ) в канале, проведен полнофакторный эксперимент. Получено уравнение регрессии (12) изменения вязкости  $\eta_{ш}$  термопластичного шликера при изменении угла  $\varphi$  наклона канала и его длины прямолинейных участков  $L$ .

$$\eta_{ш} = 874,14 - 89,52 \cdot \frac{\varphi - 30}{15} + 99,49 \cdot \frac{L - 4}{2} \quad (12)$$

Согласно полученной зависимости вязкость уменьшается при уменьшении прямых участков и увеличении угла перегиба канала. Снижение вязкости позволит улучшить заполняемость отливки в узких сечениях.

Разработана методика по выбору места подвода термопластичного шликера к отливке. В основе разработанной методики лежит принцип вписанных сфер. По аналогии с принципом разработки питающих систем в отливке. После того, как в отливку вписаны сферы, выбирается участок с наименьшим диаметром. На примере простейшей геометрии, рисунок 12, показан принцип выбора места подвода.

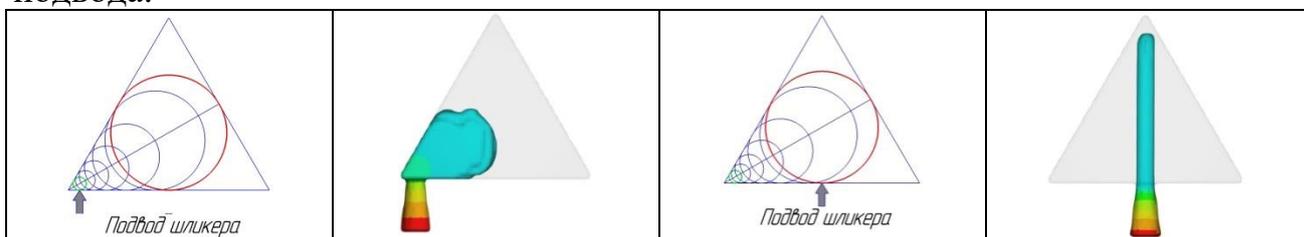


Рисунок 12 – Подвод шликера к массивному узлу

Подвод термопластичного шликера в место с наименьшим диаметром окружности предотвратит образование струйного течения. Но в отливках с несколькими массивными узлами изолированными друг от друга узкими каналами, рисунок 13, одного выбора места подвода будет недостаточно. Поскольку при выходе из узкого места в массивный узел, большая вероятность образования струйного течения.

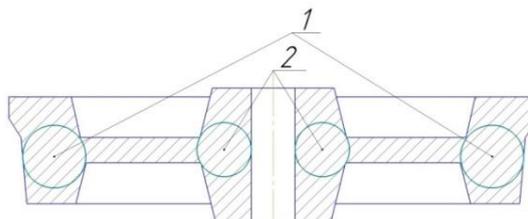


Рисунок 13 – Подвод к отливке с изолированными массивными узлами

В данном случае равномерное заполнение отливки можно обеспечить за счет подбора технологических параметров литья под давлением. Для предотвращения струйного течения, рисунок 14 (а), на входе в изолированный массивный узел можно снизить скорость шликера, рисунок 14 (б).

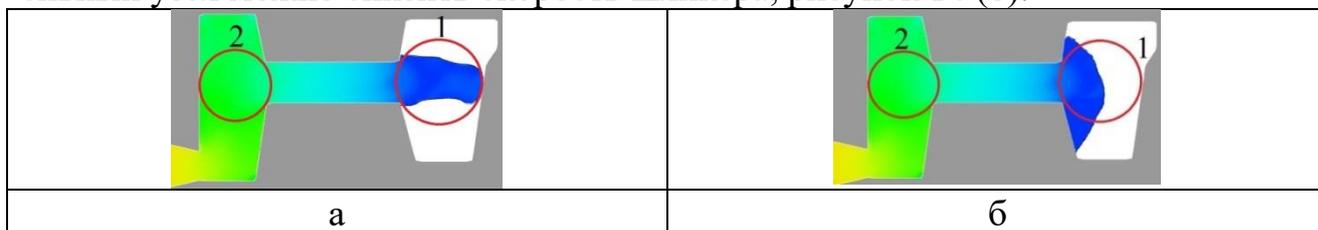


Рисунок 14 – Заполнение отливки с несколькими массивными узлами (а) – до подбора технологических параметров, (б) – после подбора.

При выборе места подвода шликера в полость пресс-формы следует обратить внимание на расширяющиеся места в отливке, в которых могут возникать струйное течение. Если конструкция отливки не позволяет уйти от струйного течения выбором места подвода шликера, то следует регулировать скорость подачи шликера на машинах литья под давлением, используя рекомендации полученные для центрального литника.

**В четвертой главе** представлены практические применения методики расчета литниковой системы и выбора параметров литья под давлением термопластичных шликеров. Показаны исследования свойств детали «Шептало» изготовленная из термопластичного шликеров 40ХМА. Исследованы механические свойства: микротвердость поверхности, шероховатость.

На основании соглашения по улучшению качества изделия для оружейной промышленности, было получено техническое задание на деталь «Шептало». Изделие служит для удержания курка на боевом и предохранительном взводе в стрелковом оружии. Допуск по контуру  $\Gamma_{-0,4}^{+0,1}$ , общие допуски на деталь по 14 качеству точности по ГОСТ 30893.1.

Для получения изделий «Шептало» изготовлена четырех гнездная пресс-форма. Конструкция литниковой системы с отливками, показана на рисунке 15.

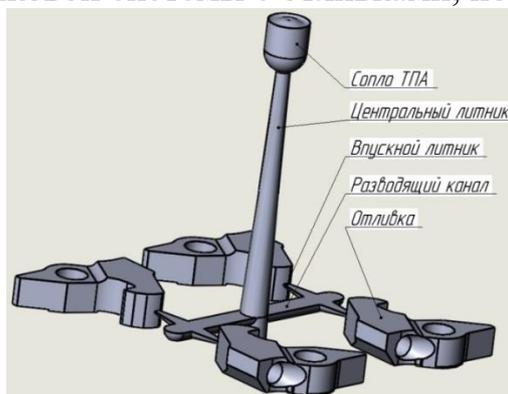


Рисунок 15 – Заводская конструкция литниковой с отливками

Отливки, полученные по заводской технологии, имели дефекты в виде пор 1, неслитин 3 и трещин 2, рисунок 16.

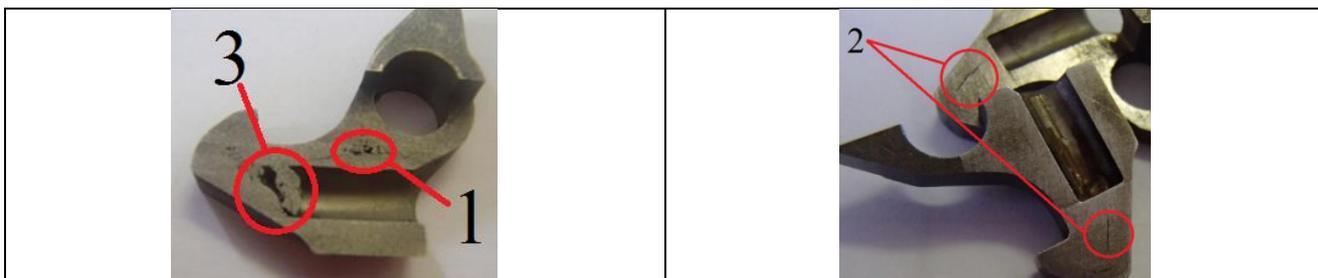


Рисунок 16 – Дефекты в детали «Шептало»

Для проверки полученных дефектов, изготовлена опытная партия деталей и проведена компьютерная томография на Phoenix GE VX M300, результаты контроля показаны на рисунке 17.



Рисунок 17 – Томография отливки «шептало»

Результаты компьютерной томографии показали, что данные дефекты зарождаются на стадии получения литой заготовки, полученных по технологическому режиму с постоянно максимальной скоростью заполнения пресс-формы, который использовался на заводе.

В области массивного узла явно выраженное пространство с воздушным карманом, также наблюдается распределение воздушных пустот в направление заполнения отливки. А в массивном узле в районе «носика» отливки, появилась полость в результате схлопывания двух потоков термопластичного шликера.

Для корректирования заводской технологии изготовления предложено два пути: разработка новой оснасти с учетом рекомендаций или подбор технологических параметров литья под давлением для существующей оснастки.

Отливка «шептало» имеет три массивных узла, которые уязвимы к образованию струйного течения термопластичного шликера, рисунок 18.

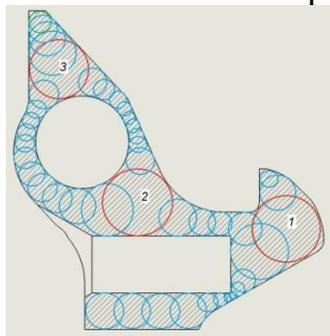


Рисунок 18 – Анализ отливки «Шептало»

Анализ отливки показал, что наиболее подходящим местом подвода термопластичного шликера в полость отливки является массивный узел, обеспечивающий плавное заполнение на этапе поступления расплава в формообразующую

полость. На рисунке 19 показан результат выбора места подвода и фронт потока шликера при выбранном месте.



Рисунок 19 – Подвод шликера к отливке «шептало»

Согласно разработанным рекомендациям, центральный литник следует в начальный момент заполнять с расходом шликера  $2,5 \text{ см}^3/\text{с}$ , а конусность  $2^\circ$ . По полученному уравнению регрессии (9) величина струи составит  $3,23 \text{ мм}$ .

$$L_{\text{стр}} = 7,75 + \frac{1,85 \cdot (2,5 - 6,25)}{3,75} + \frac{2,75 \cdot (2 - 3)}{2} = 3,23 \text{ (мм)}$$

Дополнительно к выбранным параметрам, ось центрального литника и сопла машины литья под давлением следует расположить не соосно, тем самым обеспечить образование фронта потока в начальный момент заполнения центрального литника.

После заполнения центрального литника шликер попадает в разводящие каналы, которые выполняют функцию доставки шликера от центрального литника к впускным литникам. Помимо этого в силу своих тиксотропных свойств в разводящих каналах обеспечивается снижение вязкости шликера за счет изогнутой формы с прямолинейными участками  $4,68 \text{ мм}$  под углом  $25^\circ$ . Разработанная конфигурация канала позволила снизить вязкость шликера со значения  $661 \text{ Па} \cdot \text{с}$  до  $208 \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

$$\eta_{\text{ш}} = 874,14 - 89,52 \cdot \frac{\varphi - 30}{15} + 99,49 \cdot \frac{L - 4}{2} = 208 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

На рисунке 20 представлена разработанная конструкция литниковой системы с учетом выявленных рекомендаций.

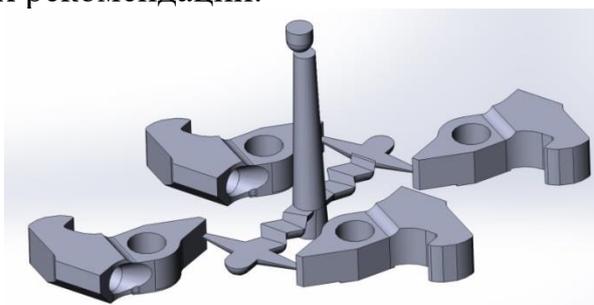


Рисунок 20 – Разработанная конструкция литниковой с отливками

Разработанная конструкция литниковой системы позволит обеспечить равномерный фронт потока термопластичного шликера без захвата воздуха в расплав и снизить вязкость перед заполнением полости отливки.

Согласно разработанной методики, был исследован второй способ снижения дефектов, а именно, подбор технологических параметров литья под давлением. В некоторых случаях подбор режима заполнения сможет скорректировать неточности проектирования элементов литниковых систем в готовой оснастке. Конфигурация отливки «Шептало» имеет несколько переходов от уз-

кого места к массивному, что требует применения ступенчатого режима заполнения. В ходе анализа куста отливок «Шептало» выделили четыре ступени заполнения: литниковая система, первый массивный узел, второй массивный узел и третий массивный узел, рисунок 21.

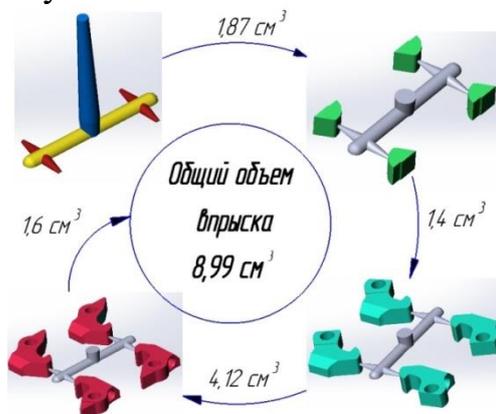


Рисунок 21 – Ступени заполнения отливки «Шептало»

Таким образом, объем литниковой системы равен  $1,87 \text{ см}^3$ , объем одной отливки  $1,78 \text{ см}^3$ , а общий объем куста с четырьмя отливками равен  $8,99 \text{ см}^3$ . Графическое изображение изменения расхода шликера в процессе заполнения полости формы представлено на рисунке 22.

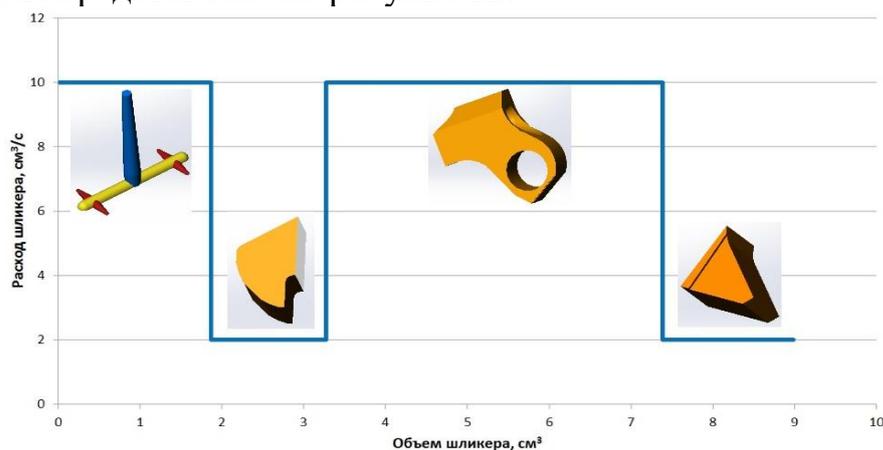


Рисунок 22 – Ступенчатый режим заполнения полости формы

Отливка, полученная по данному режиму заполнения формы, получилась без дефектов и представлена на рисунке 23.



Рисунок 23 – «Шептало» при ступенчатом заполнении

## **ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ**

1. Термопластичный шликер обладает тиксотропными свойствами, что позволяет снижать вязкость расплава в процессе механических воздействий на него при литье под давлением.
2. Разработан состав термопластичного шликера на основе металлического порошка 40ХМА с увеличенным размером частиц для снижения себестоимости готовых изделий.
3. Определена реологическая модель для описания течения термопластичного шликера с упруго-вязко-пластичными свойствами и рассчитаны параметры, позволяющие осуществлять моделирование процесса литья под давлением термопластичных шликеров.
4. Практическими экспериментами подтверждено правильность работы реологической модели с рассчитанными параметрами в процессе моделирования литья, что позволяет прогнозировать возможные места получения дефектов в отливке до начала изготовления дорогостоящей оснастки.
5. Разработаны рекомендации расчета параметров элементов литниковой системы и показаны особенности подбора технологических режимов литья под давлением термопластичных шликеров.
6. По аналогии с питанием отливок, разработана методика «вписанных сфер» для анализа заполнения полости формы термопластичным шликером, которая учитывает особенности конфигурации отливки для предотвращения струйного течения.
7. Практическое применение подбора технологических параметров литья под давлением для получения отливки «Шептало», позволило предотвратить появление дефектов в готовых изделиях.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:**

1. Коротченко А.Ю., Турунтаев И.В., Тверской М.В., Хилков Д.Э. Развитие специальных способов литья. Литейное производство. 2017. № 2. С. 21-24.
2. Коротченко А.Ю., Турунтаев И.В., Тверской М.В., Хилков Д.Э. Формирование размерной точности отливок при литье под давлением металлических смесей. Литейное производство. 2017. № 4. С. 29-33.
3. Коротченко А.Ю., Голенков Ю.В., Тверской М.В., Хилков Д.Э. Моделирование течения металлических смесей в литейной форме. Литейное производство. 2017. № 5. С. 18-22.
4. Коротченко А.Ю., Тверской М.В., Хилков Д.Э., Котомин С.В., Шабeko А.А. Разработка нового состава металлической порошковой смеси для литья под давлением. Литейное производство. 2018. № 2. С. 23-27
5. Хилков Д.Э., Геворкян А.Л. Выбор модели вязкого течения шликера. Литейное производство. 2020. № 11. С. 23-25.

**Публикации в научных изданиях, индексируемых в международных системах цитирования Scopus:**

6. Korotchenko, A.Y., Tverskoy, M.V., Khilkov, D.E., Khilkova, A.A. Use of coarse powders in injection molding process powder metallurgy and metal ceramics. (2020) 58 (11-12), pp. 730-736.
7. Korotchenko, A.Y., Khilkov, D.E., Tverskoy, M.V., Khilkova, A.A. Development of ultra-fluid compositions of feedstock for metal injection molding. (2020) Materials Science Forum, 992 MSF, pp. 529-533.
8. Korotchenko A.Y., Khilkov D.E., Tverskoy M.V. The development of new materials and modes of casting metal powder mixtures (MIM technology). Materials Science Forum. 2018. T. 945 MSF. C. 538-542.

**Материалы конференций:**

9. Хилков Д.Э. Исследование образования струйного течения в центральном литнике при литье под давлением металлических порошковых смесей. В сборнике: Будущее машиностроения России. Сборник докладов Двенадцатой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием). 2019. С. 176-179.
10. Хилков Д.Э., Тверской М.В. Получение прецизионных изделий литьем под давлением металлических порошковых смесей. В сборнике: Инновационные технологии в литейном производстве. Сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвящённой 150-летию факультета "Машиностроительные технологии" и кафедры "Технологии обработки материалов" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Под общей редакцией К.А. Батышева, К.Г. Семенова. 2019. С. 306-309.
11. Хилков Д.Э. Точность отливок при литье металлических порошковых смесей. В сборнике: Будущее машиностроения России. Сборник докладов. Союз машиностроителей России, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана. 2018. С. 98-101.
12. Котомин С.В., Шабeko А.А., Френкин Э.И., Коротченко А.Ю., Тверской М.В., Хилков Д.Э. Реологические свойства МИМ-фидстоков. Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 9. № 2-1. С. 305-310.
13. Хилков Д.Э., Коротченко А.Ю. Методики расчета литниковых систем в МИМ-технологии. В сборнике: Будущее машиностроения России. Сборник докладов Десятой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием). 2017. С. 81-82.