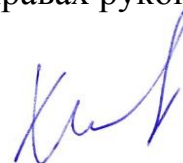


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

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»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

д.т.н., доцент

Коротченко Андрей Юрьевич

Москва, 2021

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. АНАЛИЗ СВОЙСТВ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ШЛИКЕРА И МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЛИТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ	11
1.1 Параметры термопластичного шликера для МИМ-технологии.....	11
1.1.1 Гранулометрический состав металлического порошка для термопластического шликера (МИМ-технологии).....	11
1.1.2 Форма металлического порошка для МИМ-технологии.....	15
1.1.3 Связующий компонент для термопластичного шликера	17
1.2 Методики расчета литниковой системы.....	18
1.2.1 Дефекты при литье термопластичного шликера.....	18
1.2.2 Конструкционные особенности и расчеты элементов литниковой системы.	21
1.2.3 Рекомендации подвода расплава к полости формы.....	28
1.3 Особенности вязкого течения шликера по каналам пресс-формы.....	29
1.3.1 Способ определения вязкости	29
1.3.2 Вязкость термопластичного шликера.....	32
1.4 Анализ реологических моделей термопластичного шликера	33
Выводы по первой главе.....	36
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ШЛИКЕРА НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОРОШКА 40ХМА	38
2.1 Состав термопластичного шликера и способ изготовления	38

2.1.1	Состав и характеристики металлического порошка	39
2.1.2	Состав и характеристики связующих компонентов	42
2.1.3	Технология получения термопластичного шликера	45
2.2	Методика проведения эксперимента	46
2.3	Результаты эксперимента.....	49
2.3.1	Исследование прочностной характеристики образцов из 42CrMo4 и 40ХМА.....	50
2.3.2	Определение показателя текучести расплава (ПТР).....	51
2.3.3	Определение вязкости шликера	54
2.3.4	Определение коэффициентов реологической модели вязкого течения.....	56
	Выводы по второй главе	59
3.	ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛИТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЛИТЬЯ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ШЛИКЕРА	60
3.1	Проверка модели течения на адекватность.....	61
3.1.1	Течение шликера по цилиндрическому каналу.....	61
3.1.2	Свободное течение термопластичного шликера из сопла машины литья под давлением.....	65
3.2	Исследование влияния технологических факторов на течение термопластичного шликера по каналам литниковой системы.....	67
3.2.1	Изменение вязкости термопластичного шликера при трении о стенки каналов.....	69
3.2.2	Влияние теплообмена формы и термопластичного шликера на вязкость..	71
3.2.3	Исследование влияния геометрии каналов литниковой системы на течение термопластичного шликера.....	74
3.2.3.1	Конусность и впускной диаметр центрального литника	74

3.2.3.2	Распределение вязкости термопластичного шликера в разводящем канале	77
3.2.4	Выбор места расположения впускного литника	86
3.3	Рекомендации расчета элементов литниковой системы	92
	Выводы по третьей главе.....	94
4.	РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ И МЕТОДИКИ ПОЛУЧЕНИЯ ДЕТАЛИ «Шептало»	95
4.1	Применение разработанной методики расчета литниковой системы для отливки «Шептало».....	97
4.1.1	Определение состава литниковой системы и количества гнезд в пресс-форме	98
4.1.2	Выбор места подвода термопластичного шликера	99
4.1.3	Рекомендации для центрального литника.....	101
4.1.4	Рекомендации для разводящих каналов.....	103
4.2	Подбор технологического режима литья под давлением.....	105
4.2.1	Заполнение полости формы с постоянной скоростью.....	107
4.2.2	Ступенчатый режим заполнения.....	110
4.3	Проверка разработанной методики и импорт замещение шликера	113
4.3.1	Исследование механических свойств образцов из шликера 40ХМА	113
4.3.1.1	Исследование твердости поверхности	113
4.3.1.2	Исследование шероховатости поверхности	115
4.3.2	Исследование микроструктуры.....	117
4.3.3	Томографический контроль опытных образцов «Шептало»	119
	Выводы по четвертой главе.....	120
	ОБЩИЕ ВЫВОДЫ	121

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	122
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	124
ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ РАБОТЫ	136

ВВЕДЕНИЕ

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. С быстрым развитием машиностроения, выдвигаются всё более высокие требования к отливкам. 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. В отличие от методов прессования при шликерном литье частицы порошка не испытывают нагрузки и не деформируются. Частицы укладываются довольно плотно друг к другу, образуя ненапряженную регулярную микроструктуру с плотной упаковкой частиц [1,2,3,4,5].

В широком смысле шликерное литьё представляет собой метод формования изделий из шликеров. Различают следующие основные способы шликерного литья: литьё в пористые формы, формование из шликеров электрофоретическим методом и литьё из термопластичных шликеров (ПИМ-технология). 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 [6,7,8].

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 [9].

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 литья под давлением термопластичных шликеров (термопластавтоматов) предъявляются повышенные требования к рабочим параметрам и режимам литья [10,11,12,13]. 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 [14].

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 [15].

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 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.

Практическая значимость работы:

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 позволило 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.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и общих выводов.

В первой главе приведен литературный обзор состава термопластичного шликера и параметров компонентов с реологическими свойствами. Рассмотрены существующие методики расчета литниковой системы, классификация дефектов отливок из шликера и проведен анализ реологических моделей.

Во второй главе представлены исследования реологических свойств разработанного термопластичного шликера на основе металлического порошка 40ХМА и зарубежного аналога 42CrMo4. Подобрана реологическая модель течения шликера и рассчитаны коэффициенты уравнения.

В третьей главе проведена проверка реологической модели, течения термопластичного шликера по каналам литниковой системы на адекватность. Исследовано влияние геометрии каналов литниковой системы на течение шликера. Разработаны рекомендации для расчета литниковой системы.

В четвертой главе представлено практическое применение методики расчета литниковой системы.

1. АНАЛИЗ СВОЙСТВ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ШЛИКЕРА И МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЛИТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

1.1 Параметры термопластичного шликера для МИМ-технологии

Термопластичный шликер состоит из металлического порошка и сложной композиции полимеров. На рисунке 1.1 представлен термопластичный шликер Catamold 316L.

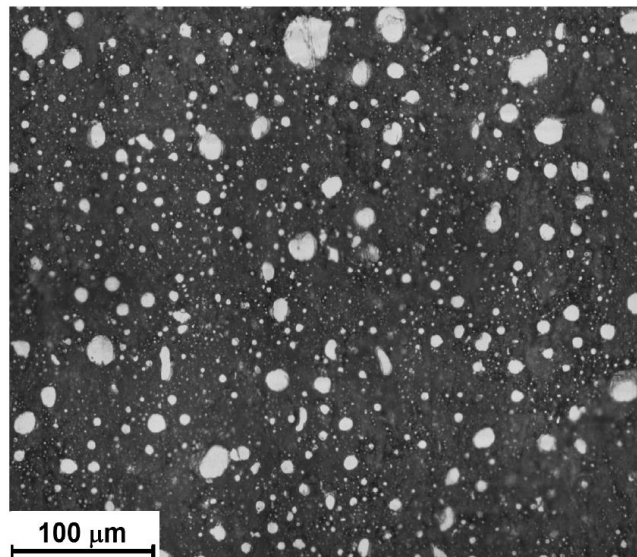


Рисунок 1.1 – Металлический порошок со связующим [16]

1.1.1 Гранулометрический состав и размер металлического порошка для термопластического шликера (МИМ-технологии)

Металлические порошки характеризуются, прежде всего, диаметром частиц, максимальный размер которых обычно не превышает 25 мкм [17]. Средний же размер частиц составляет порядка 5 мкм. В общем случае гранулометрический состав порошка определяется тремя значениями диаметров: d_{10} , d_{50} и d_{90} , которые соответствуют средним значениям 10% порошка от всего объема, 50% и 90% соответственно [18]. На рисунке 1.2 показано рекомендуемое распределение ча-

стиц порошка по фракциям для МИМ-технологии: $d_{10} = 4$, $d_{50} = 8$ и $d_{90} = 22$ мкм [19].

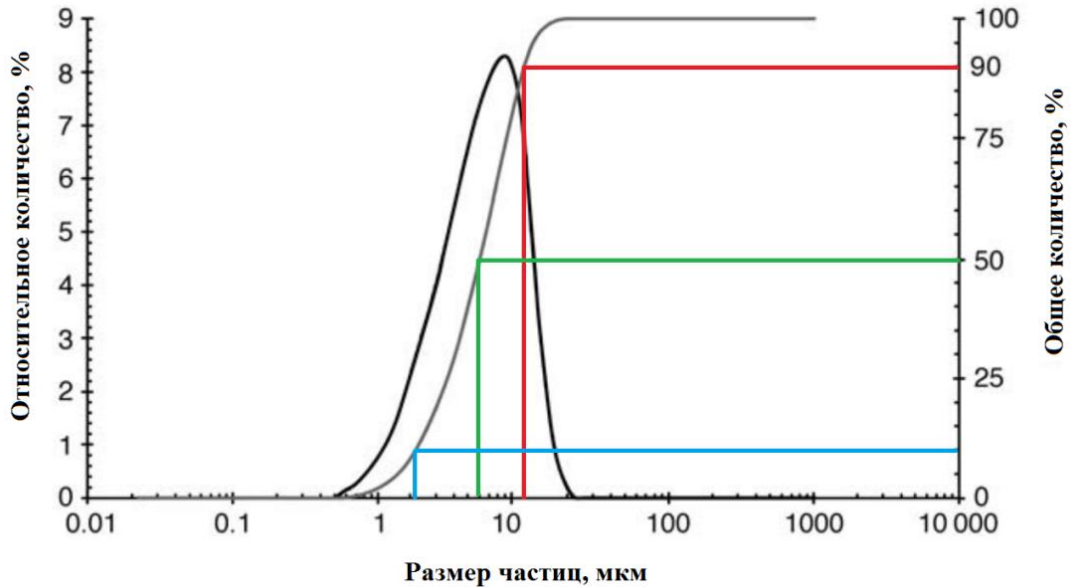


Рисунок 1.2 – Распределение частиц порошка по фракциям

Дисперсность порошка оказывает большое влияние на плотность изделия и качество поверхности отливки [16,20,21]. Важным параметром является число контактов, приходящееся на единицу объема. Для сферических частиц одного порядка число контактов равно:

$$N_V = \frac{K \cdot n}{2} \quad (1.1)$$

где K - координационное (контактное) число, учитывающее вид упаковки,
 n - число частиц порошка в единице объема:

$$n = \frac{\rho_{см}}{\rho_0 \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{cp}^3} \quad (1.2)$$

где r_{cp}^3 - средний диаметр частиц;

$\rho_{см}$ - плотность смеси;

ρ_0 - плотность порошка.

Важно, что увеличение числа контактов на 45% приводит к увеличению плотности отливки на 15% [22]. Из выражения 1.1 и 1.2 видно, что уменьшение

размера частица приводит к увеличению числа контактов, а соответственно к увеличению плотности отливки [23,24,25].

Использовать порошки больших размеров, возможно, но с рядом ограничений. Во-первых, увеличится минимальная толщина стенки отливки. Во-вторых, более большие частицы порошка, упакованные совместно не имеют такой плотной упаковки, как более малые частицы, по рассмотренным уже причинам [16].

Следует отметить, что рекомендация по размеру частиц порошка носит довольно общий характер и, как известно, не всегда уменьшение размера частиц приводит к повышению служебных свойств готовых деталей. На рисунке 1.3 представлены результаты исследований смесей с различными гранулометрическими составами, которые приведены в таблице 1.1 [26].

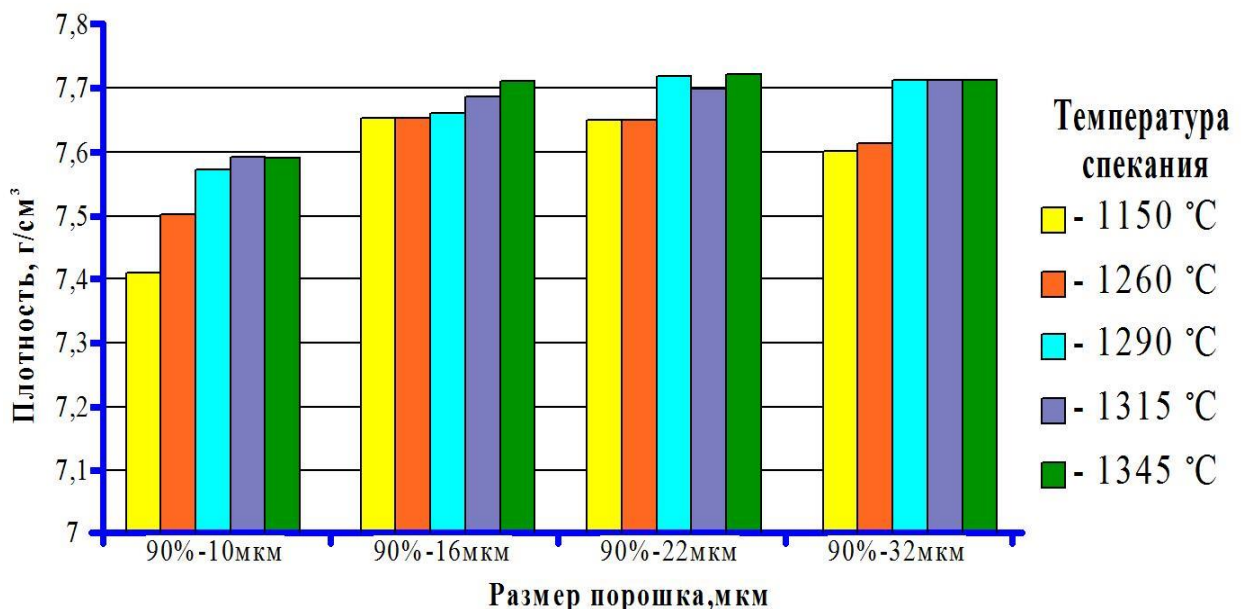


Рисунок 1.3 – Изменение плотности изделий при разных температурах спекания и гранулометрического состава

Плотность детали получена из смеси с порошком 90%-10 мкм в диапазоне 7,4 – 7,58 г/см³, а из смеси с порошком 90%-32 мкм 7,6- 7,71. Самую высокую плотность показали детали из смеси с порошком 90%-22 в диапазоне 7,64- 7,72. Этот факт еще раз доказывает, что использование порошка с меньшей фракцией не всегда приводит к повышению служебных свойств детали.

Таблица 1.1 – Гранулометрический состав металлических порошков

Размер порошка	d_{10} , мкм	d_{50} , мкм	d_{90} , мкм
90% 10 мкм	3,25	5,82	10,00
90% 16 мкм	3,64	8,25	15,85
90% 22 мкм	4,58	11,05	21,76
90% 32 мкм	4,33	12,17	27,71

По гранулометрическому составу частиц можно выделить три крупных группы порошков для разных направлений использования: порошковая металлургия (размер частиц порошка от 100 мкм), аддитивные технологии (до 40 мкм и выше) и МИМ технология (до 20 мкм). В этой же последовательности происходит и удорожание металлического порошка.

На рисунке 1.4 показано среднее значение изменения стоимости металлических порошков российских производителей, таких как Amet, Полема, Синтез-ПКЖ и КЗТС (Кировский завод твердых сплавов), от размера частиц.

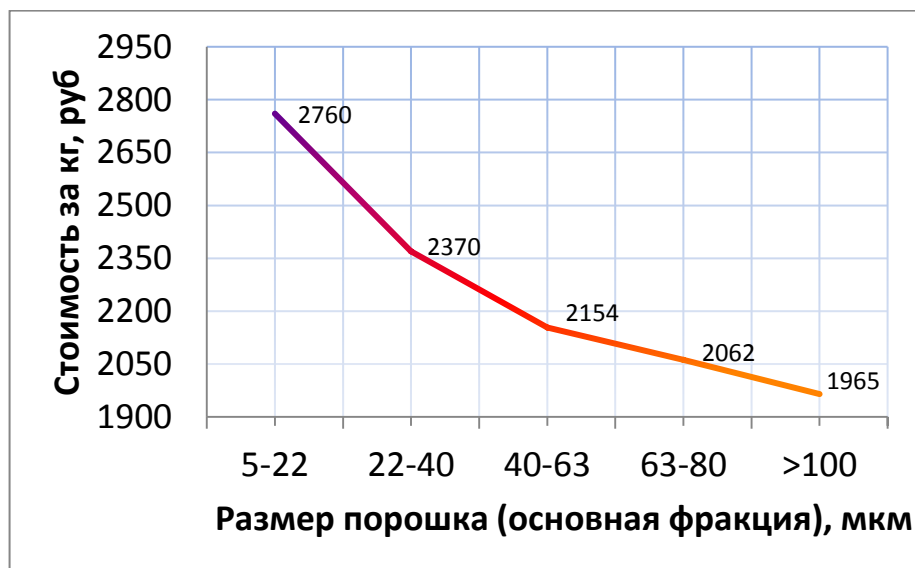


Рисунок 1.4 – Стоимость металлического порошка от его размера

Стоимость металлического порошка увеличивается с уменьшением его размера из-за трудоемкости его получения.

1.1.2 Форма металлического порошка для МИМ-технологии

Еще одна важная характеристика – конфигурация частиц. Для снижения сопротивления течения при ЛПД и шероховатости поверхности конечных изделий стремятся использовать частицы со сферической поверхностью. Также упрощается процесс плакирования частиц связующим материалом во время приготовления шликера и формируется более плотная упаковка в процессе литья.

Допустимо использовать и другие формы порошков, которые создают менее плотную упаковку. Изменение относительной плотности от формы порошка представлено на рисунке 1.5.

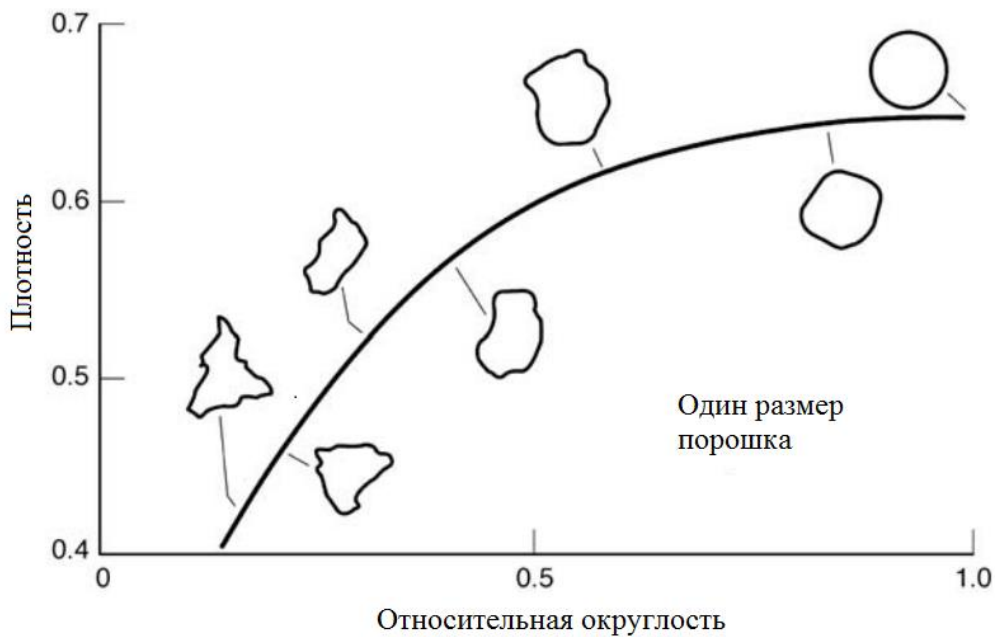


Рисунок 1.5 – Изменение плотности упаковки от формы порошка[16]

Проанализировав российский рынок поставщиков металлических порошков, выяснилось, что порошки сферической формы, рекомендуемого гранулометрического состава не изготавливают из-за недостатка необходимого оборудования и спроса.

На рисунке 1.6 показаны исследования порошков различной формы.

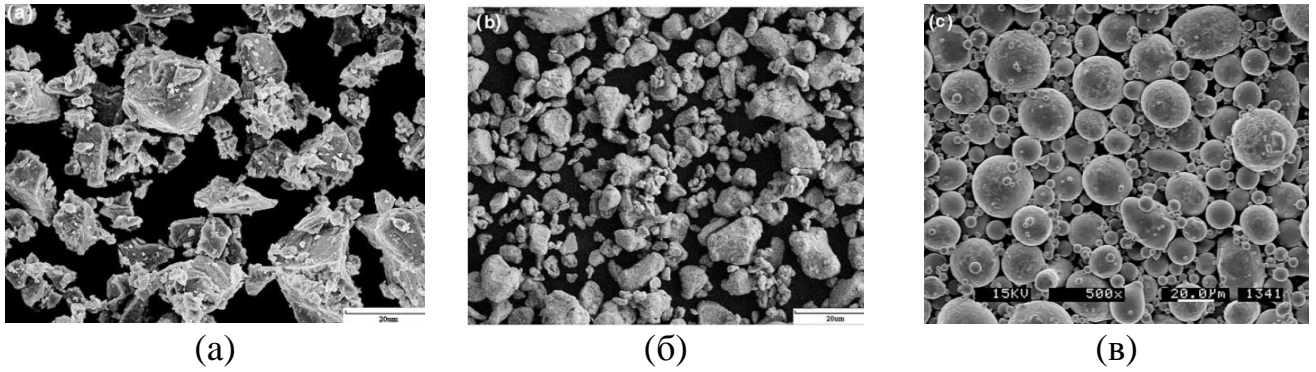


Рисунок 1.6 – Фотографии порошков со сканирующего электронного микроскопа: (а) порошок после механического измельчения, (б) порошок полученный диспергированием расплава и (в) диссоциация карбонатов

Исследование реологических свойств термопластичного шликера с порошками разной формы проходили на капиллярном ареометре. Данные исследования представлены на рисунке 1.7.

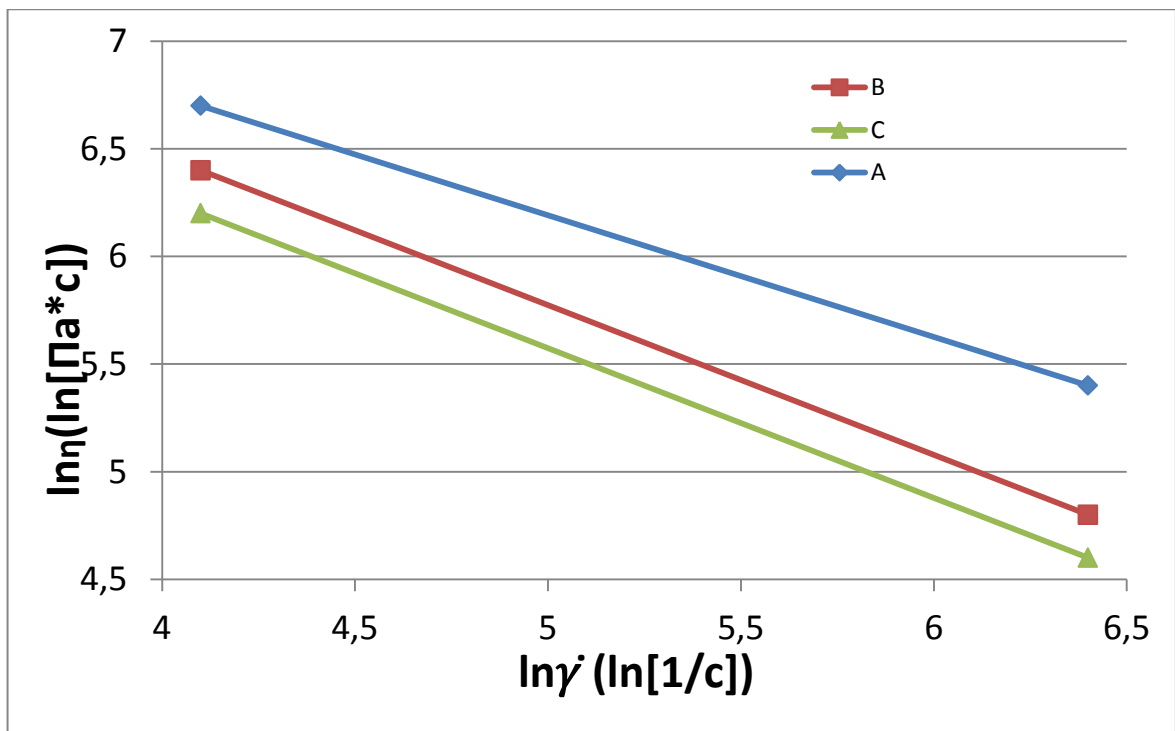


Рисунок 1.7 – Зависимость вязкости смеси с различной формой порошка от скорости сдвига

Термопластичный шликер со сферическим порошком показал самую низкую вязкость.

1.1.3 Связующий компонент для термопластичного шликера

Первое поколение связующих состояло из двух компонентов: воска или смазочных компонентов, теряющих устойчивость при низких температурах (обеспечивают течение композиции при формовании) и термопластичных полимеров, теряющих устойчивость при относительно высоких температурах (обеспечивают прочность отливки). Процесс термообработки композиций на основе двухкомпонентных связующих был двух-стадийным и достаточно длительным [27].

Для сокращения времени термообработки появились многокомпонентные связующие. Впервые их разработала фирма BASF [15,28]. Они состояли из основного компонента полиацеталь или полиметилэтилен и небольших добавок полиолефинов. Полученный состав связки позволил сократить время термообработки в 10 раз [29].

В зависимости от используемой связки термопластичный шликер можно разделить на две группы. Шликер среднего, на основе воска, и высокого, на основе полиацетала, давления прессования. Давление формообразования для разных шликеров представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Давление прессования для разных типов термопластичных шликеров

Шликеры	Среднего давления	Высокого давления
Давление прессования, атм.	От 400 до 800	Более 800

В диссертации рассмотрены термопластичные шликеры высокого давления. Данные смеси на 40-70 % (по объему) состоят из металлического порошка и на 30-60% из связующего. Компоненты связующего вещества и их соотношение представлены в таблице 1.3 [17,30-40].

Таблица 1.3 – Концентрация связующих компонентов

Компонент	Массовая доля, %
Полиацеталь	80-98
Полиэтилен низкой плотности	1-18
Стеариновая кислота	1-2

В процессе литья под давлением связующий компонент является определяющим для установки технологических параметров. Во многом, от состава и концентрации связующего компонента зависят реологические свойства термопластичного шликера.

Термопластичный шликер должен обладать определенными реологическими свойствами для получения бездефектных отливок. В случае чрезмерно низкой вязкости термопластичного шликера существует большая вероятность отделения порошка и связующего, а при высокой вязкости возникают трудности равномерного смешивания и формообразования. Компоненты связки должны обладать высокой теплопроводностью и низким тепловым коэффициентом расширения для предотвращения дефектов, образующихся в результате тепловых напряжений [20].

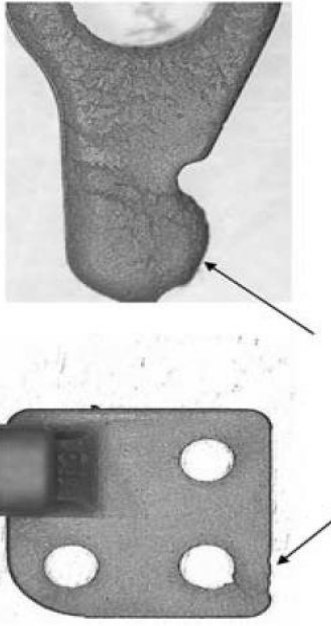
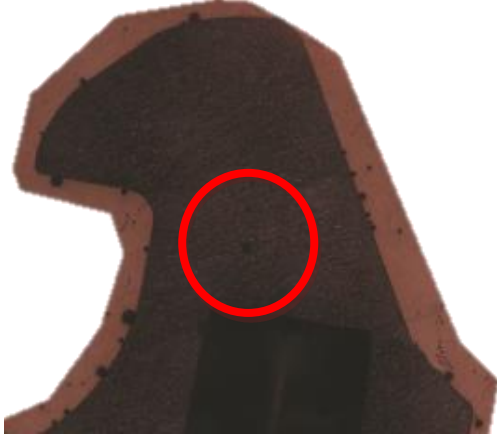
1.2 Методики расчета литниковой системы

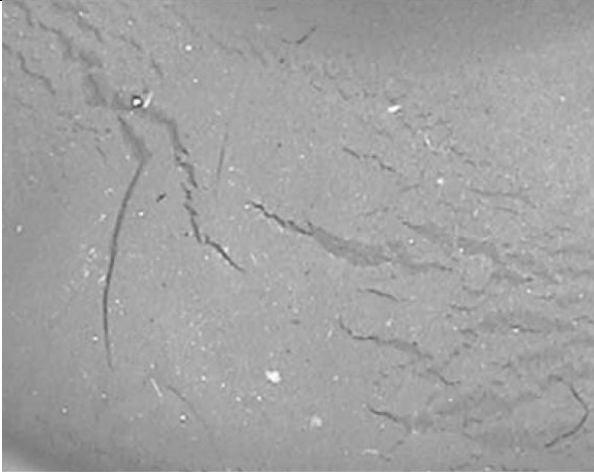

1.2.1 Дефекты при литье термопластичного шликера

В таблице 1.4 представлены часто встречаемые дефекты литья металлических порошковых смесей и их возможные причины возникновения.

Таблица 1.4 – Литейные дефекты

Термины и определения	Изображение	Основные причины дефекта
<p>Неслитина – щель или отверстие в стенке отливки, образовавшееся вследствие неслития встречных потоков расплава.</p> <p>Неслитина характерна для сплавов с широкими интервалом кристаллизации наблюдается обычно в тонких стенках отливок.</p> <p>Эти дефекты легко обнаруживаются при визуальном осмотре отливок.</p>		<p>Низкая скорость впрыска, низкая температура расплава, низкое давление в момент уплотнения</p>

<p>Недолив – дефект в виде неполного образования отливки вследствие незаполнения полости формы металлом</p>		<p>Маленький размер литника, низкое давление впрыска, низкая скорость впрыска, отсутствие вентиляционных каналов, низкая температура расплава, низкая температура пресс-формы.</p>
<p>Газовая раковина – дефект в виде полости. Газовая раковина в отличие от усадочной имеет сферическую форму и гладкую чистую поверхность</p>		<p>Влажное сырье, низкая скорость заполнения, неправильно определено место подвода расплава</p>

<p>Спай - дефект в виде углубления с закругленными краями на поверхности отливки.</p>		<p>Низкая скорость впрыска, низкая температура расплава.</p>
<p>Отслоение связующего от металлического порошка (сегрегация)</p>		<p>Низкая скорость впрыска, низкое давление прессования</p>

В основном причиной возникновения представленных дефектов являются параметры скорости и давления потока. Данные параметры устанавливаются конструкцией литниковой системы и регулируются машиной литья под давлением. Поэтому необходим точный подбор площадей поперечных сечений элементов литниковой системы, их форма и места подвода, чтобы урегулировать скорость и давление потока расплава металлической порошковой смеси.

1.2.2 Конструкционные особенности и расчеты элементов литниковой системы

Конфигурация литниковой системы определяется множеством факторов, которые в основном зависят от формы и размеров отливки и свойств используе-

мого материала [41]. В таблице 1.5 показаны факторы, определяющие конструкцию литников.

Таблица 1.5 – Факторы, определяющие конструкцию литников

Деталь	Материал
<ul style="list-style-type: none"> – Форма и размеры – Объем – Толщина стенок 	<ul style="list-style-type: none"> – Вязкость – Структура – Наполнители – Время отверждения – Диапазон размягчения – Температура размягчения – Термостойкость
Литьевая машина	Литьевая форма
<ul style="list-style-type: none"> – Тип смыкания – Давления впрыска – Скорость впрыска 	<ul style="list-style-type: none"> – Автоматическое извлечение детали – Ручное извлечение детали – Температура литниковой системы

Литниковая система для литья термопластичных шликеров состоит из центрального литника, разводящих каналов и впускного литника. На рисунке 1.8 представлен состав литниковой системы.

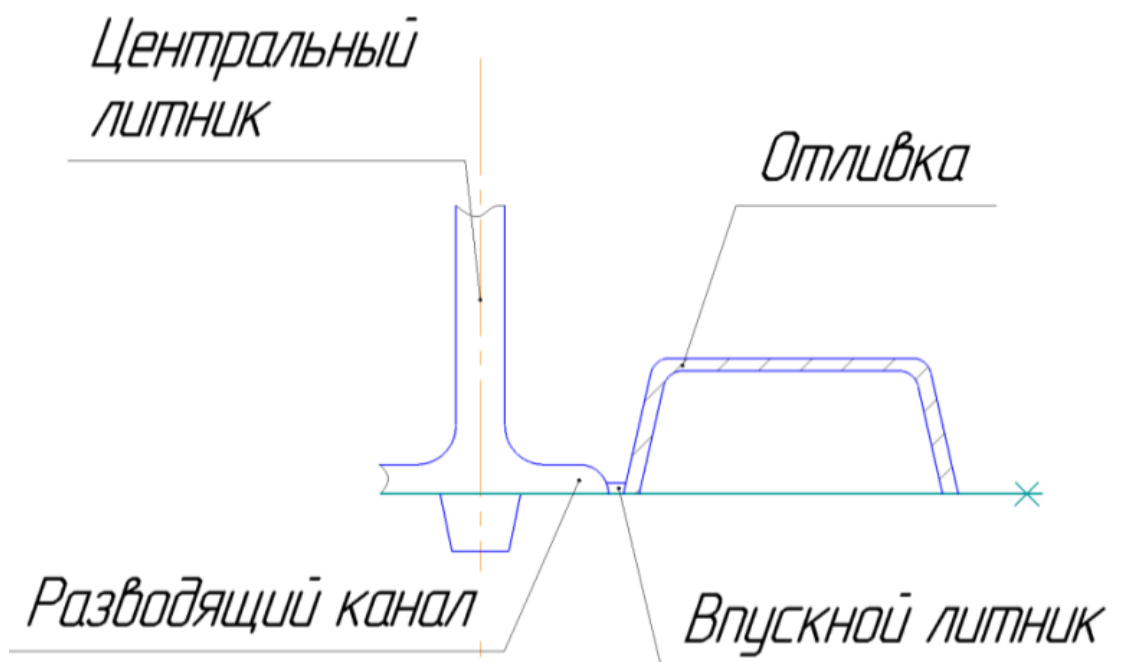


Рисунок 1.8 – Состав литниковой системы

Центральный литник представляет собой конический канал, рисунок 1.9, через который термопластичный шликер от сопла литьевой машины поступает в разводящие каналы[42].

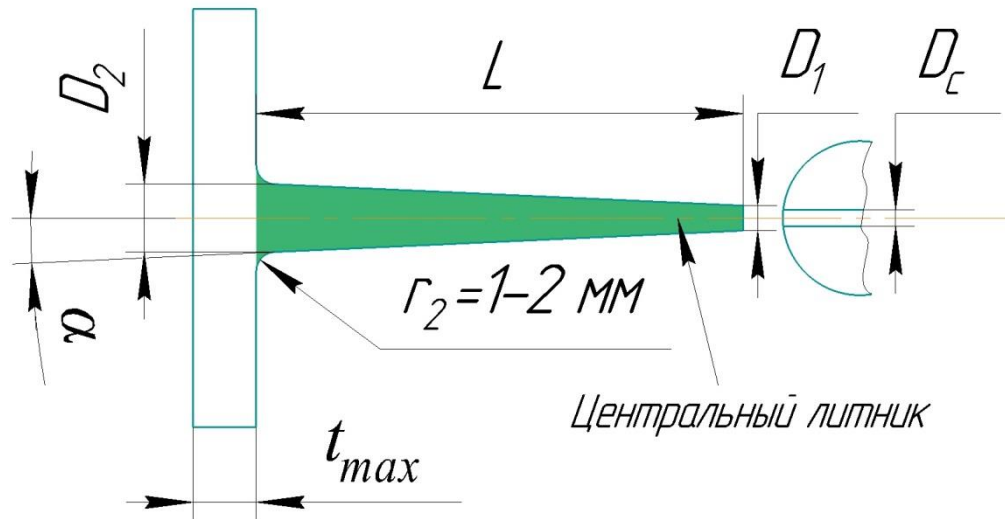


Рисунок 1.9 – Конструкция центрального литника

Определяющей величиной для диаметра литника на выходе является толщина отливки:

$$D_2 \geq t_{max} + 1,5 \text{ (мм)} \quad (1.3)$$

где D_2 – диаметр на выходе литника;

t_{max} – максимальная толщина отливки.

Диаметр литника на входе определяется от диаметра сопла термопластавтомата:

$$D_1 \geq D_c + 1 \text{ (мм)} \quad (1.4)$$

где D_c – диаметр сопла ТПА;

D_1 – диаметр на входе литника.

Тангенс угла наклона литника равен:

$$\tan(\alpha) = \frac{D_2 - D_1}{2 \cdot L} \quad (1.5)$$

где L – длина литника;

α – угол конуса литника (стандартные втулки литника имеют конусность 2°-5°).

Эмпирические формулы расчета центрального литника выглядят следующим образом [43]:

Диаметр на входе в литник:

$$D_1 = 0.2 \cdot \sqrt{\frac{V}{\pi \cdot \vartheta \cdot \tau}} \quad (1.6)$$

где V – объем впрыска шликера, см³

ϑ – скорость течения шликера в центральном литнике, см/с

τ – время впрыска шликера, с

$$L \leq (5 \div 9) \cdot D_1 \quad (1.7)$$

$$D_2 = D_1 + 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (1.8)$$

Скорость расплава уменьшается на растущий диаметр центрального литника. В конце центрального литника есть небольшое углубление, куда попадают первые «холодные» порции материала для предотвращения недолива и дефектов в отливке, рисунок 1.10.

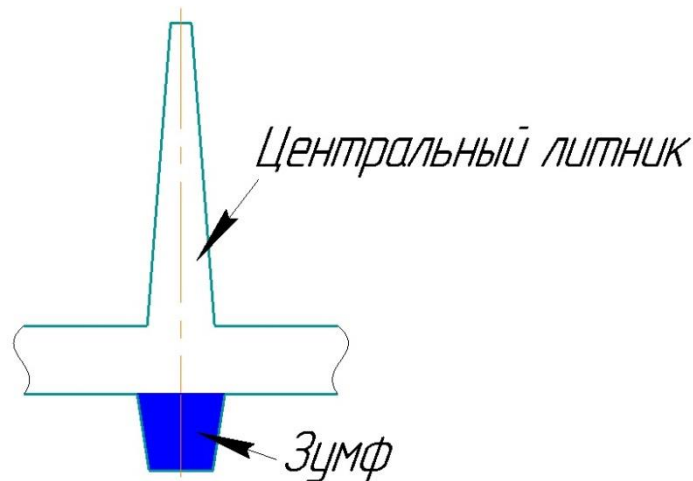


Рисунок 1.10 – Место сбора «холодной» порции расплава – зумф

В этом же месте идет разветвление потока шликера по разводящим каналам. Для обеспечения непрерывного потока общая площадь поперечных сечений разводящих каналов должна равняться максимальной площади поперечного сечения центрального литника. Конструкция разводящих каналов и их положение в пресс-форме должны обеспечивать симметричное распределение давления со стороны

материала относительно центральной оси пресс-формы. На рисунке 1.11 представлены несколько типов поперечного сечения разводящих каналов.

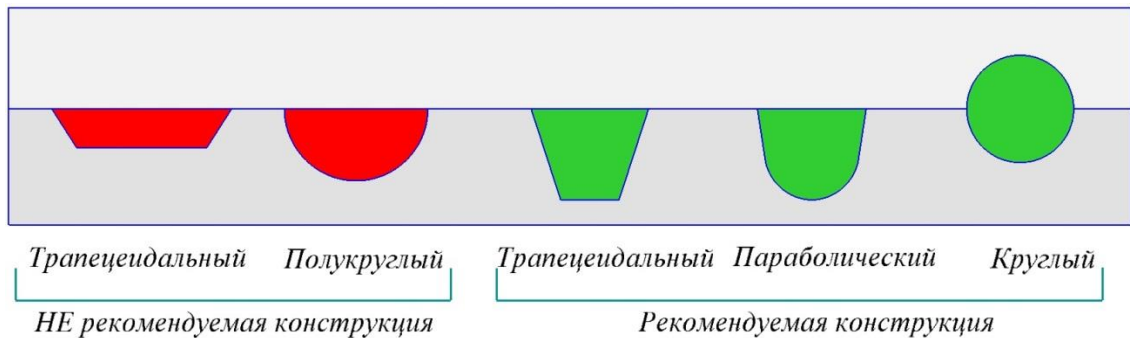


Рисунок 1.11 – Распространенные типы поперечных сечений разводящих каналов

По рекомендациям источников [16,44-47] размеры разводящих каналов определяются из отношения площади поперечного сечения к его периметру. Таким образом, находится гидравлический диаметр D_{Γ} , который определяет индекс сопротивления потока смеси внутри каналов разной формы:

$$\frac{4 \cdot f_{\text{р.к.}}}{\text{П}_{\text{р.к.}}} = D_{\Gamma} \quad (1.9)$$

где $f_{\text{р.к.}}$ – площадь разводящего канала;

$\text{П}_{\text{р.к.}}$ – периметр разводящего канала.

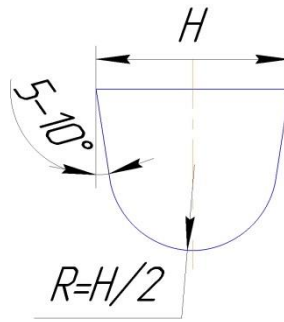
Для круглого канала:

$$D_{\Gamma} = D \quad (1.10)$$

$$\frac{f_{\text{р.к.}}}{\text{П}_{\text{р.к.}}} = 0,25D \quad (1.11)$$

Для параболического канала:

$$D_{\Gamma} = 0,9116 \cdot D \quad (1.12)$$



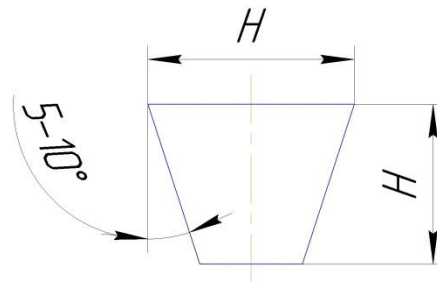
$$D = 0,7 \cdot H$$

$$H = \frac{2}{3} \cdot D$$

$$\frac{f_{\text{р.к.}}}{\Pi_{\text{р.к.}}} = 0,2 \cdot D \quad (1.13)$$

Для трапецидального канала:

$$D_{\Gamma} = 0,8771 \cdot D$$



$$\frac{f_{\text{р.к.}}}{\Pi_{\text{р.к.}}} = 0,21 \cdot D \quad (1.14)$$

Эмпирическая формула определения параметра разводящего канала:

$$D_{\text{р.к.}} = \frac{\sqrt{G} \cdot \sqrt[4]{L_{\text{р.к.}}}}{8} \quad (1.15)$$

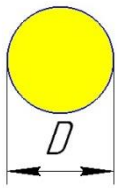
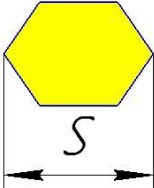
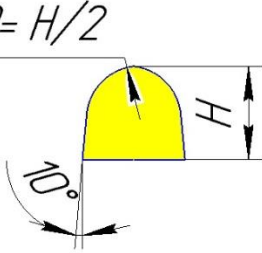
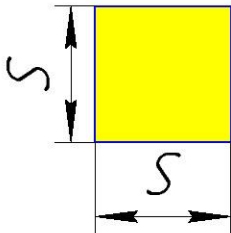
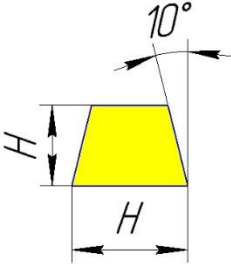
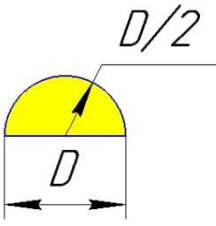
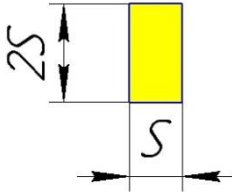
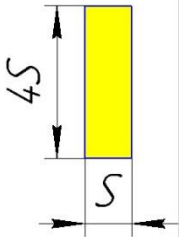
где $L_{\text{р.к.}}$ – длина разводящего канала, мм

G – масса детали, г.

Продолжением разводящих каналов являются впускные литники, они представляют собой суженную часть канала, непосредственно примыкающую к полости формы. Канал сужается с целью легкого отделения. При определении размеров поперечного сечения впускного канала надо учитывать, что впрыск связан с

идущими одновременно двумя процессами – заполнение полости формы и уплотнения массы. Определяющим фактором при этом является скорость сдвига, которая влияет на вязкость расплава и время, в течение которого расплав должен оставаться во впуске незатвердевшим, что необходимо для уплотнения массы в полости [9]. В таблице 1.6 показаны типовые конструкции впускных литников и рекомендации отношений диаметров гидравлического и впускного литника.

Таблица 1.6 – Конструкции впускных литников (питателей)

Гидравлический диаметр				
D_r	D	$0,9523D$	$0,9116D$	$0,8862D$
Гидравлический диаметр				
D_r	$0,8771D$	$0,8642D$	$0,8356D$	$0,7090D$

Размеры и конструкция литниковых каналов значительно влияют на параметры литья [16]. Чем длиннее литниковый путь, тем выше требуется давление впрыска, и происходят большие потери тепла на пути от сопла ТПА до полости формы. Поэтому литейные каналы необходимо делать как можно короче [48,49]. Расположение питателей должно быть выбрано таким образом, чтобы обеспечивать полное заполнение формы и максимальное давление прессования.

Формула расчета впускного литника:

$$f_{\text{в.к.}} \leq \frac{D_1}{n_{\text{в.к.}}} \quad (1.16)$$

Где $f_{\text{в.к.}}$ – площадь впускного канала;

$n_{\text{в.к.}}$ – количество впускных каналов.

1.2.3 Рекомендации подвода расплава к полости формы

Термопластичный шликер необходимо подводить в массивную часть отливки, рисунок 1.12, при этом необходимо обеспечивать равномерное распределение давления в полости формы.

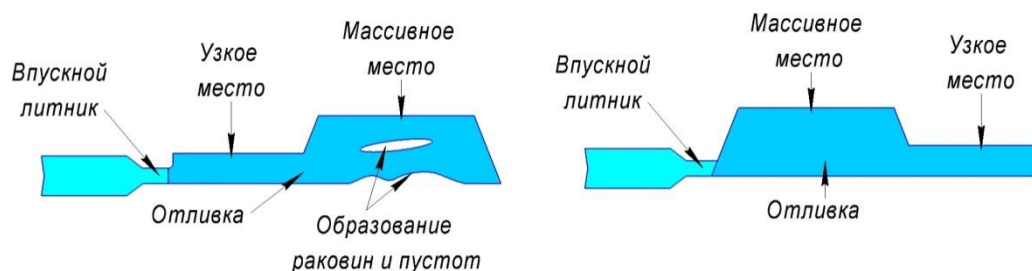


Рисунок 1.12 – Рекомендации места подвода расплава

В тоже время для предотвращения струйного заполнения, рисунок 1.13, впускной литник располагают таким образом, чтобы поток термопластичного шликера на входе встречался со стенкой формы или стержнем. [20]

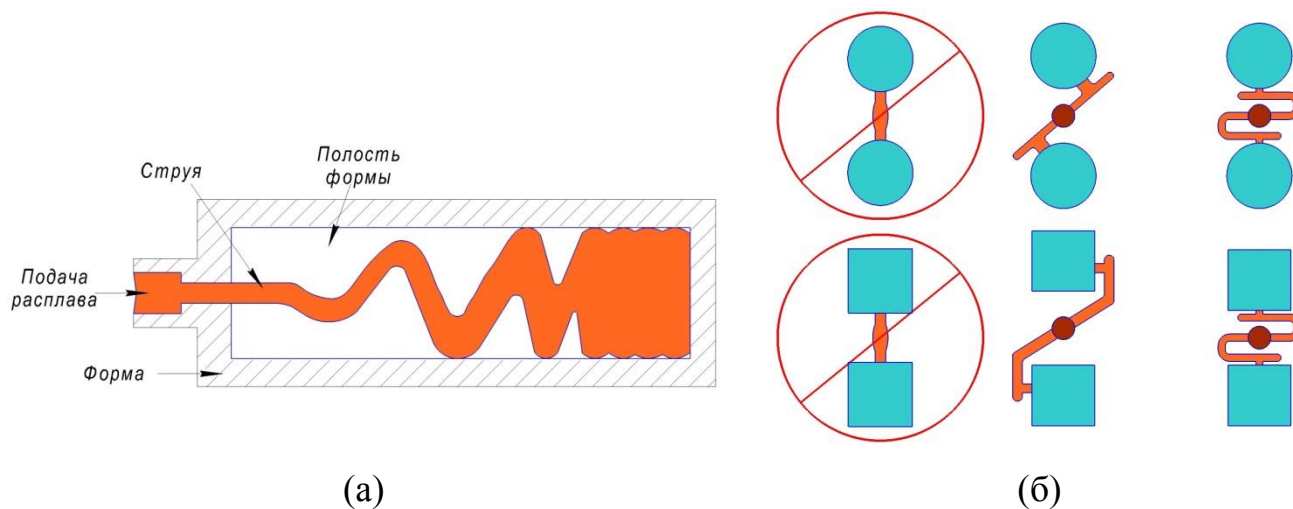


Рисунок 1.13 – (а) – Струйное заполнение полости формы расплавом,
(б) – Предотвращение струйного заполнения

Возможны варианты с использованием нескольких впускных литников. Это уменьшает время, необходимое для заполнения полости формы, но возникают проблемы качественного слияния двух образовавшихся потоков без захвата воздуха. Подвод материала в несколько мест рекомендуется, если деталь большой длины, а толщина стенки мала. В таком случае несколько питателей обеспечат полное заполнение формы.

1.3 Особенности вязкого течения шликера по каналам пресс-формы

1.3.1 Способ определения вязкости

Вискозиметры – оборудование для определения вязкости подразделяют на несколько типов, в зависимости от метода измерения вязкости. Существуют три основных метода измерения вязкости: капиллярный, ротационный и Стокса (падающий шарик). Выбор способа определения вязкости зависит от реологических свойств исследуемого материала. Для определения вязкости термопластичных шликеров используют капиллярные вискозиметры, рисунок 1.14 [50].

Капиллярный метод основан на законе Пуазейля и заключается в измерении времени протекания через капилляр расплава известной массы при определенном перепаде давлений.

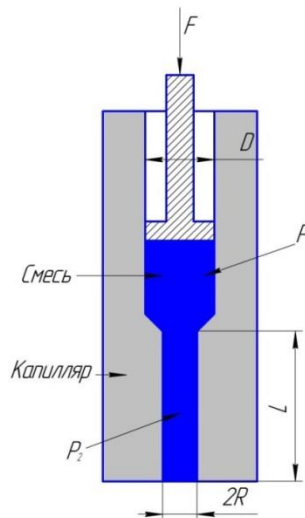


Рисунок 1.14 – Капиллярный метод измерения вязкости

Гранулы термопластичного шликера погружают в капилляр и разогревают до рабочей температуры 190 °С. Поршнем с усилием F смесь проходит через капилляр диаметром D со скоростью V , расходом Q и перепадом давления ΔP , где:

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} V \quad (1.17)$$

$$\Delta P = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (1.18)$$

Основываясь на неньютоновской механике жидкости [46], скорость сдвига γ и скорость потока Q через капиллярную трубку длиной L могут быть прямо выражены в уравнениях (1.17) и (1.18):

$$\gamma = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot R^3} \text{ или } \gamma = \frac{\Delta PR}{2\eta L} \quad (1.19)$$

$$Q = \frac{\pi \Delta PR^4}{8\eta L} \quad (1.20)$$

где η – вязкость рассматриваемого исходного сырья.

γ – скорость сдвига;

τ – напряжение сдвига;

Скорость сдвига и напряжение сдвига могут быть получены по следующим уравнениям (1.19) и (1.20):

$$\gamma = \frac{D^2}{R^3} V \quad (1.21)$$

$$\tau = \frac{2RF}{\pi D^2 L} \quad (1.22)$$

Вязкость окончательно задается в уравнении (1.21) отношением между τ и γ :

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \quad (1.23)$$

В ротационных вискозиметрах исследуемая жидкость находится в зазоре между двумя соосными цилиндрами. Один из цилиндров (ротор) вращается, а другой неподвижен, рисунок 1.15. Вязкость определяется по крутящему моменту при заданной угловой скорости или по угловой скорости при заданном крутящем моменте.

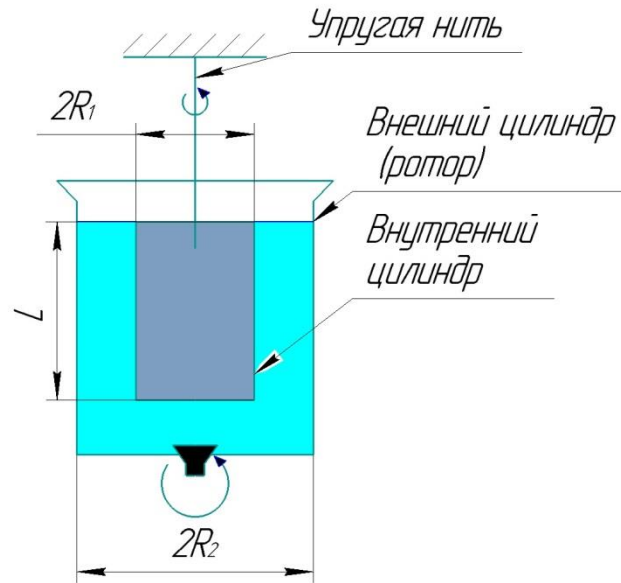


Рисунок 1.15 – Ротационный метод измерения вязкости

$$M_1 = 4\pi\omega\eta \cdot \frac{R_1^2 \cdot R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \quad (1.24)$$

где R_1, L – радиус и длина внутреннего цилиндра;

ω – постоянная угловая скорость ротора;

R_2 – радиус ротора;

η – вязкость;

M_1 – момент вращения, передаваемый через вязкую жидкость.

При этом крутящий момент M_1 уравнивается моментом сил упругости нити M_2 :

$$M_1 = \frac{(\pi d^2 G \varphi)}{32l} \quad (1.25)$$

где d, l – диаметр и длина упругой нити;

φ – угол, на который закручивается неподвижно закрепленная нить;

G – момент упругости материала нити.

Приравняем выражения (1.24) и (1.25) и вычислим вязкость, которая равна:

$$\eta = \frac{(R_2^2 - R_1^2)G\varphi}{8\pi^2 L R_1^2 R_2^2 32l\omega} \quad (1.26)$$

или

$$\eta = \frac{k\varphi}{\omega} \quad (1.27)$$

где k – постоянная ротационного вискозиметра.

Возможен вариант с вращением внутреннего цилиндра, тогда вязкость будет равна:

$$\eta = \frac{(R_2^2 - R_1^2)G\tau}{8\pi^2 LR_1^2 R_2^2 32L} \quad (1.28)$$

или

$$\eta = \frac{kG\tau}{L} \quad (1.29)$$

где G – момент, необходимый для поддержания постоянной частоты вращения, τ – время одного оборота внутреннего цилиндра в секундах.

1.3.2 Вязкость термопластичного шликера

Термопластичный шликер обладает свойством тиксотропии, поэтому его вязкость снижается с ростом скорости сдвига. На рисунке 1.16 показаны кривые вязкости от скорости сдвига для термопластичного шликера Catamold 316L при различных температурах.

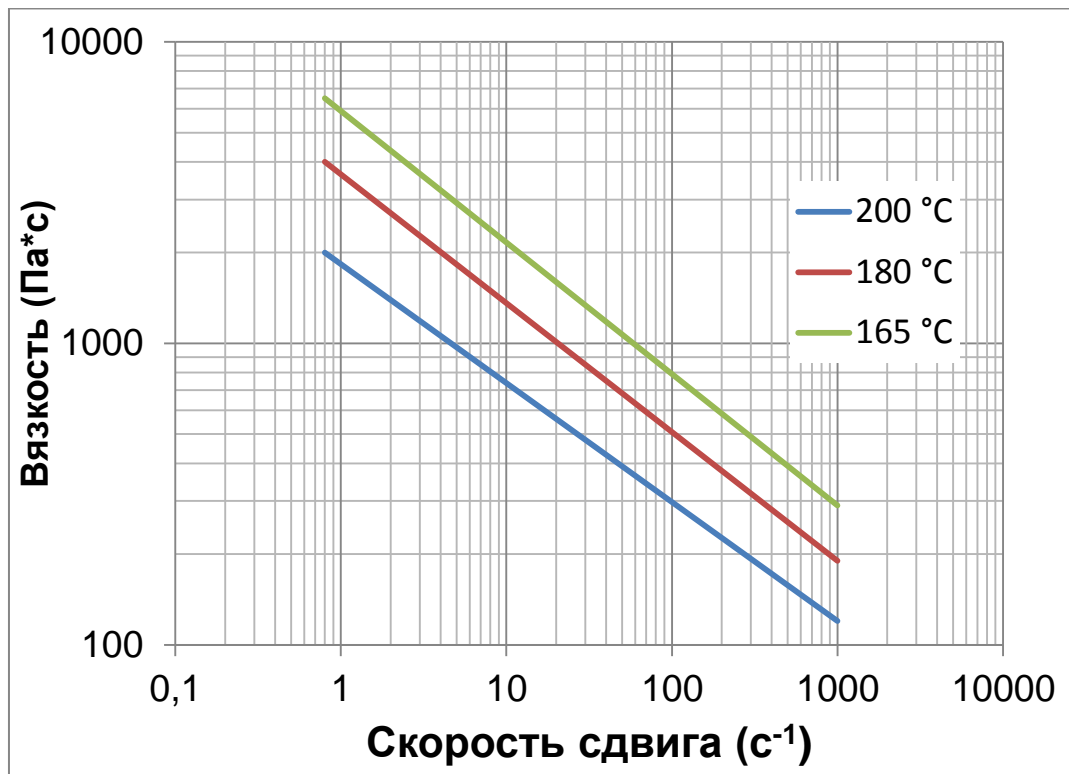


Рисунок 1.16 – Зависимость вязкость от скорости сдвига для Catamold 316LG в диапазоне рабочих температур[51]

В начальный момент вязкость термопластичного шликера крайне высока, и поэтому при впрыске используют давление, достигающее 60 МПа, а при подпрессовке это давление может удваиваться. Высокое давление поддерживается до полного перемерзания литника [52-55].

1.4 Анализ реологических моделей термопластичного шликера

Одним из наиболее важных параметров термопластичного шликера является вязкость. Чистый полимер в расплавленном состоянии ведет себя как неньютоновская жидкость и проявляет вязкопластические свойства. С увеличением скорости сдвига уменьшается вязкость полимера. Термопластичный шликер ведет себя подобным образом, но имеет большую вязкость, чем чистый полимер. Зависимость вязкости от скорости сдвига описывается выражением:

$$\eta = m\dot{\gamma}^{n-1}, \quad (1.30)$$

где η – вязкость;

m – постоянная материала;

$\dot{\gamma}$ – скорость сдвига;

n – коэффициент мощности ($0 < n < 1$).

Проанализировав характер изменения вязкости при различных скоростях сдвига, можно выделить три области. Первая область – с небольшими скоростями сдвига, которая характеризуется практически ньютоновским поведением смеси. Во второй области происходит нелинейное уменьшение вязкости, а в третьей области повторение ньютоновского поведения при больших скоростях сдвига [56].

Для описания этих особенностей предложен целый ряд моделей. Для металлических смесей чаще всего используются модели Кросса и Карро, а также их модификации. Модель Кросса выглядит следующим образом:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}}, \quad (1.31)$$

где η_0 – вязкость при бесконечно малых скоростях сдвига;

n – коэффициент мощности ($0 < n < 1$);

τ^* – напряжение сдвига.

Значение η_0 определяется:

$$\eta_0 = B \exp(T_b/T) \exp(\beta p) \quad (1.32)$$

где B , T_b и β – константы;

T – температура термопластичного шликера;

p – внешнее давление.

Модель Кросса учитывает как ньютоновское, так и неньютоновское поведение смеси в зависимости от влияния давления и температуры на вязкость.

Модификация модели Кросса-Уильям-Ландел-Ферри (Кросс-ВЛФ) отличается определением вязкости при малых скоростях сдвига, которая уточняется семью константами:

$$\eta_0 = D_1 \exp \left[- \frac{A_1(T-T^*)}{\bar{A}_2 + D_3 p + (T-T^*)} \right], \quad (1.33)$$

где T^* – температура стеклования полимера: $T^* = D_2 + D_3 p$;

D_1, D_2, D_3, A_1 и \tilde{A}_2 – константы модели.

Модель Кросса способна описать только две области поведения шликера при изменении скорости сдвига. Для описания всех трех областей используют модель Карро:

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = [1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{(n-1)/2}, \quad (1.34)$$

где η_0 – вязкость при бесконечно малых скоростях сдвига;

η_∞ – вязкость при больших скоростях сдвига;

λ – характеристическая константа с размерностью времени;

n – эмпирическая постоянная ($0 < n < 1$).

Значение вязкости при малых скоростях сдвига определяется, как и в модели Кросса, а характеристическая константа λ находится из выражения:

$$\lambda = \frac{1}{\dot{\gamma}_{cr}}, \quad (1.35)$$

где $\dot{\gamma}_{cr}$ – критическая скорость сдвига.

Модель Карро была модифицирована японским ученым Ясуда. Введенный дополнительный коэффициент придал модели Карро большую гибкость при описании областей кривых, описывающих зависимость вязкости от скоростей сдвига. Математическая модель Карро-Ясуда выглядит следующим образом:

$$\eta = \eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty)[1 + (\lambda \dot{\gamma})^a]^{(n-1)/a}, \quad (1.36)$$

где η_0 – вязкость при бесконечно малых скоростях сдвига;

η_∞ – вязкость при больших скоростях сдвига;

λ – характеристическая константа с размерностью времени;

n – эмпирическая постоянная (от 0 до 1);

a – параметр Ясуда.

Модели Кросса и Карро, а также их модификации описывают течение жидкостей при любых сколь угодно малых напряжениях сдвига. Модели Кросса и Карро были построены для скоростей сдвига до 10^5 с^{-1} и диапазоне температур $170\text{--}210^\circ\text{C}$, который охватывает диапазон рабочих температур во время реального литья под давлением. Однако, как показал целый ряд экспериментов, у металлических смесей существует предел текучести τ_Y , и если действующие напряжения

сдвига меньше этого предела, то смесь ведет себя как твердое тело (течение отсутствует). Это доказывает то, что металлическая смесь относится к вязкопластическим телам.

Для описания вязкопластического поведения часто используются модель Бингама:

$$\tau = \tau_Y + \eta_p \dot{\gamma}, \quad (1.37)$$

где τ – касательное напряжение;

τ_Y – предел текучести;

η_p – пластическая вязкость.

Модель Хершеля – Балкли:

$$\tau = \tau_Y + K \dot{\gamma}^n, \quad (1.38)$$

где K и n – константы.

Пластическая вязкость в этих моделях отлична от эффективной вязкости и является ее составной частью.

Для описания линейного участка используют модель Бингама-Шведова:

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma}, \quad (1.39)$$

где τ_0 – динамическое напряжение сдвига.

Выводы по первой главе

1. Мелкодисперсные (до 25 мкм) сферические порошки имеют высокую стоимость.
2. Использование мелкодисперсных порошков не приводит к однозначному улучшению служебных свойств.
3. Форма металлического порошка влияет на механические свойства отливки (плотность).
4. Форма металлического порошка влияет на реологические свойства термопластичного шликера.

5. Соотношение металлического порошка и связующего, концентрация компонентов влияют на реологические свойства термопластичного шликера.
6. Конструкция ЛС зависит от множества параметров, в том числе от реологических свойств используемого материала.
7. Рекомендаций расчета элементов ЛС для литья термопластичных шликеров нет.
8. При проектировании ЛС для литья под давлением термопластичных шликеров, необходимо учитывать особенность наполнителя (металлического порошка).
9. Перегибы каналов ЛС должны увеличивать скорость сдвига для снижения вязкости смеси.
10. Термопластичные шликеры ведут себя, как упруго-вязко-пластическое тело.
11. При увеличении скорости сдвига уменьшается вязкость смеси, что говорит о наличии тиксотропных свойств.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ШЛИКЕРА НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОРОШКА 40ХМА

2.1 Состав термопластичного шликера и способ изготовления

Высокие служебные свойства деталей, полученные по МИМ-технологии, в немалой степени зависят от служебных свойств исходных материалов – термопластичных шликеров [57,58]. По данным [59] в мировом производстве сейчас используют тысячи разных марок материалов, среди которых отсутствуют исходные российские материалы, что приводит к снижению нашей конкурентоспособности и увеличению зависимости от зарубежных поставок. Следовательно, разработка отечественных исходных материалов – стратегическая задача в развитии высокотехнологичных способов литья.

Цель эксперимента – показать механизм создания и испытания отечественных составов, термопластичных шликеров, не уступающих по свойствам лучшим зарубежным аналогам. Работу по созданию нового состава термопластичного шликера проводили на кафедре «Литейные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана».

В России предпринимались попытки создания отечественных составов термопластичных шликеров [62]. Однако реологические свойства материалов не были изучены, и для исследования был выбран порошок карбонильного железа, который не содержал легирующих элементов и вследствие этого не мог быть аналогом тех марок сталей, которые предлагают западные фирмы.

Для изготовления термопластичного шликера была выбрана конструкционная легированная сталь 40ХМА. Выбор именно этой марки стал обусловлен областью ее применения. Сталь 40ХМА используется для изготовления ответственных деталей общего назначения в машиностроении (в том числе, в оборонной про-

мышленности). 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.

2.1.1 Состав и характеристики металлического порошка

Для изготовления металлической порошковой смеси использовался металлический порошок сферической формы марки 40ХМА [29,60]. Производитель порошка фирма «Полема». Химический состав порошка определен с помощью Olympus Vanta Series C. Данные представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Химический состав металлического порошка 40ХМА

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

Химический состав порошка соответствует ГОСТ 4543-71. Это хромомолибденовая сталь, обладающая повышенной прокаливаемостью. Данная сталь позволяет изготавливать детали, работающие при температуре до 500 °С.

На рисунке 2.1 представлена диаграмма гранулометрического состава металлического порошка. К размеру порошка в металлической смеси предъявляются особые требования, ведь от этого зависят очень многие как эксплуатационные свойства деталей, так и параметры техпроцесса их изготовления [61,62].

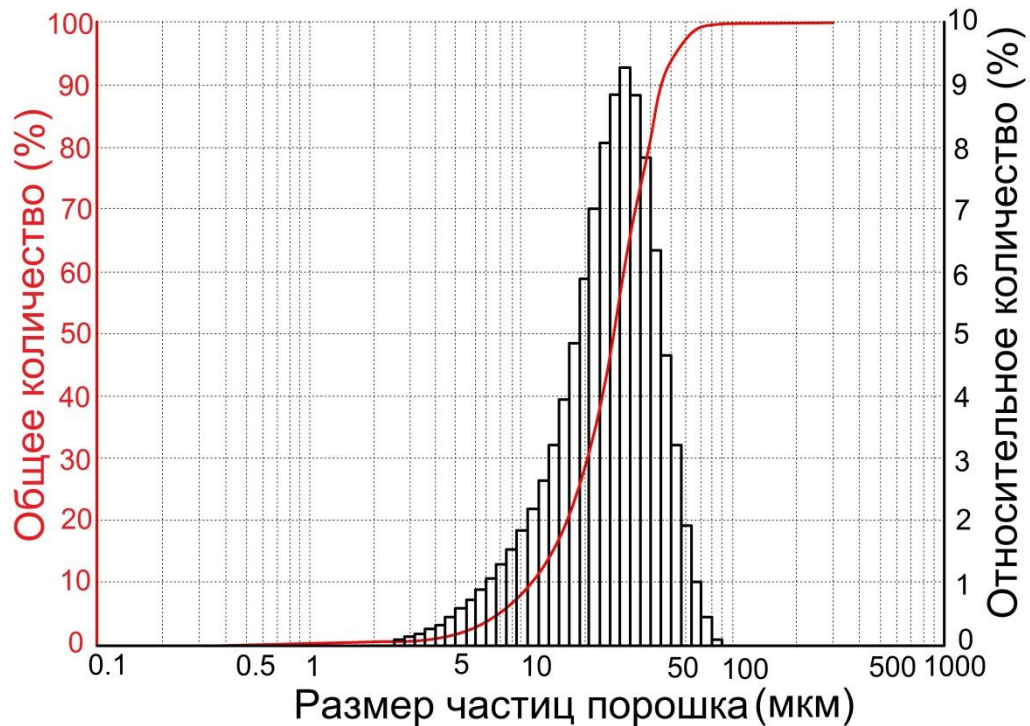


Рисунок 2.1 – Диаграмма гранулометрического состава порошка

Основная фракция порошка $d_{10} = 11$, $d_{50} = 28$ и $d_{90} = 48$ мкм. Измерения проводились на гранулометрическом анализаторе Microtrac Bluewave. Размер используемого порошка для изготовления термопластичного шликера намеренно больше рекомендованных значений для применения в МИМ-технологии.

Методика выбора фракции порошка для отливок различной конфигурации основана на получении гексагональной плотнейшей упаковки (ГПУ), используя уравнение Богдана Т.В. (2.1):

$$k = \frac{N \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3}{V_{яч}} \quad (2.1)$$

где k - коэффициент плотности упаковки;

$V_{яч}$ - объем элементарной ячейки;

R - радиус сферического порошка;

N - количество порошка в элементарной ячейке объема.

На рисунке 2.2 представлена элементарная ячейка с металлическим порошком.

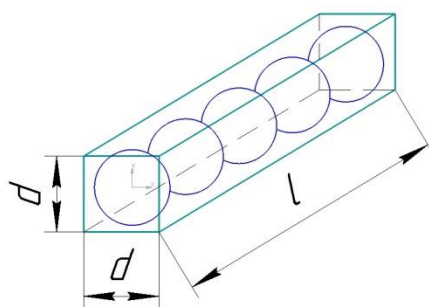


Рисунок 2.2 – Элементарная ячейка с металлическим порошком

Для получения зависимости фракции порошка от минимальной толщины стенки выражение Богдана Т.В. было преобразовано к виду:

$$l_{\min} = \frac{N \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot R^3}{d^2 \cdot k} \quad (2.2)$$

где l_{\min} - минимальная толщина стенки отливки;

d - диаметр частицы порошка.

В таблице 2.2 представлена классификация минимальной толщины стенки отливки от фракции порошка.

Таблица 2.2 – Минимальная толщина стенки отливки от фракции порошка

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

Увеличение размера порошка позволит значительно снизить себестоимость изделий. Так же порошки с фракцией до 40-50 мкм применяются для аддитивных технологий лазерного спекания [63-65], которые хорошо распространены на территории России.

Исследование формы частиц порошка стали 40ХМА при разном увеличении показано на рисунке 2.2. Изображения частиц порошка были получены с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCANVEGA3.

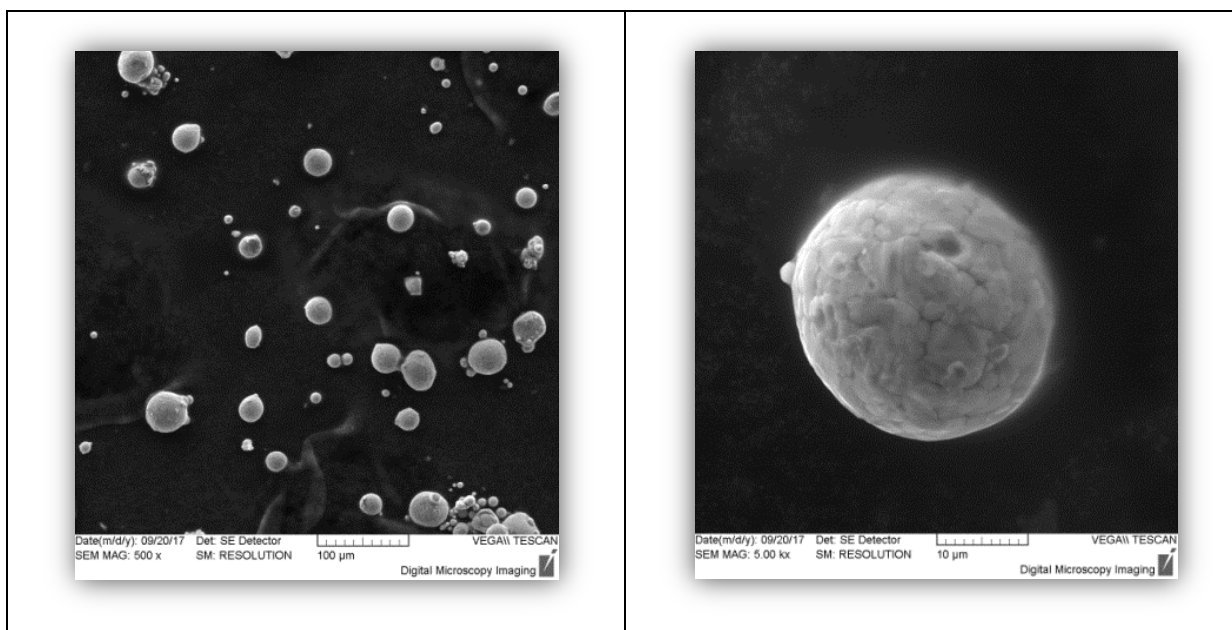


Рисунок 2.2 – Форма металлического порошка

По снимкам можно сказать, что форма порошка очень близка к сферической. Сферическая форма металлического порошка 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 [66-70].

2.1.2 Состав и характеристики связующих компонентов

Получение отливки надлежащего качества необходимо, чтобы металлические частицы были полностью покрыты связующим и не агрегировали в нем. Для этого поверхность частиц должна хорошо смачиваться связующим, а среда, в которой распределены твердые частицы, должна быть достаточно вязкой. В то же время, слишком высокая вязкость связующего отрицательно сказывается на качестве литья.

Связующие компоненты должны обладать высокой теплопроводностью и низким термическим коэффициентом расширения для предотвращения дефектов, образующихся в результате термических напряжений, обеспечивать необходимые реологические свойства металлической смеси для предотвращения литейных де-

фектов и хорошо перерабатываться, не теряя своих свойств при повторном использовании. Все эти требования приводят к тому, что связующее для МІМ является многокомпонентным. Обычно оно состоит из основного компонента и добавок.

В качестве основного компонента связующего был выбран полиацеталь или полиоксиметилен (ПОМ) КОСЕТАLK700 производитель Kolon Plastics. ПОМ обеспечивает текучесть расплава в процессе получения литой заготовки. Химическая структура ПОМ представлена на рисунке 2.3.

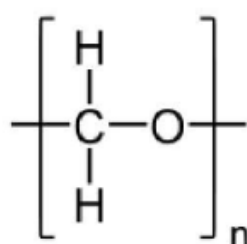
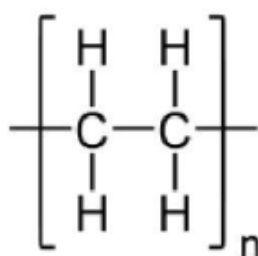


Рисунок 2.3 – Структура ПОМ

Полиацеталь $(\text{---CH}_2\text{---O---})_n$ — это технический термопласт, продукт полимеризации формальдегида. Представляет собой белые кристаллические гранулы с температурой плавления около 170 °С.

В роли добавок использовали полиэтилен высокого давления (ПВД/LDPE) производства «Казаньоргсинтез» и стеариновую кислоту.

ПВД используют для сохранения формы детали после удаления ПОМ. На рисунке 2.4 показана химическая структура ПВД.



**Polyethylene
(PE)**

Рисунок 2.4 – Структура ПВД

ПВД – это термопластичный полимер этилена, который относится к классу полиолефинов. Является органическим соединением и имеет длинные молекулы $\dots\text{—CH}_2\text{—CH}_2\text{—CH}_2\text{—CH}_2\text{—}\dots$, где «—» обозначает ковалентные связи между атомами углерода. Представляет собой бесцветные гранулы.

Стеариновая кислота играет роль поверхностно-активного вещества, позволяя обеспечить лиофилизацию поверхности металлических частиц, что является дополнительным фактором стабилизации металлической дисперсии в смеси полимеров и улучшает смачиваемость металлических частиц расплавом полимеров, что в конечном итоге приводит к более однородной структуре упаковки металлических частиц в отливке [71].

Технические характеристики связующих компонентов представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Технические характеристики связующих компонентов

Наименование показателя	Величина		
	ПОМ	ПВД	Стеариновая кислота
Плотность, кг/м ³	1410	917 – 922	940
Показатель текучести расплава при 190 °С и нагрузке 21,6 кгс, г/10 мин	27	0,25 – 0,49	-
Температура плавления, °С	166	115	70
Предел прочности, МПа	70	не менее 9,5	-
Относительное удлинение при разрыве, %	15	не менее 500	-
Диапазон рабочей температуры, °С	-50...+100	-45...+70	-
Твердость по Шору, МПа	85	14-25	-

Характеристики связующих компонентов взяты из паспортов производителей. Литейные свойства смеси во многом зависят от ПОМ, так как показатель текучести расплава у ПОМа на порядок выше ПВД [72-76]. Предел прочности на уровне 70 МПа, что обеспечивает высокую манипуляторную прочность литых заготовок.

2.1.3 Технология получения термопластичного шликера

Получение термопластичного шликера – это многостадийный технологический процесс. Качество смешивания металлического порошка со связующими компонентами влияет на равномерность свойств отливки. В качественном термопластичном шликере металлический порошок равномерно распределен по всему объему массы, который в дальнейшем гранулируется и подается в машину литья под давлением (термопластавтомат).

Для получения качественного термопластичного шликера важно выдержать следующие параметры: порядок смешивания, температуру смешивания, время смешивания и концентрацию компонентов.

В первую очередь перемешивается металлический порошок и стеариновая кислота при температуре 190 °С в течение 30 минут. Далее делается навеска гранул ПВД и ПОМ и перемешиваются в отдельной таре без нагрева. Смесь гранул разделяется на три равные доли и поочередно добавляется в разогретый смеситель, где уже металлический порошок смешался со стеариновой кислотой. Интервал добавления долей 30 минут. По окончании смешивания, полученную смесь выливают в чистую емкость и охлаждают.

Установка для смешивания представлена на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Лабораторный смеситель

Смеситель состоит из основания 1, к которому присоединен мотор-редуктор 2 и терморегулируемая камера 3. Внутри камеры располагается два шнека, вращающиеся в разные стороны. Они работают при высокой частоте около 300об/мин, что позволяет получать однородные смеси.

Термопластичный шликер состоит из 60% (по объему) из металлического порошка и 40% связующего. Связующее вещество состоит из 90% (по массе) полиацетала и 10% полиэтилена высокого давления, доля стеариновой кислоты составляет 1% от общей массы ПОМ и ПВД. Пропорции компонентов термопластичного шликера представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Пропорции компонентов термопластичного шликера

Компонент	Процентное содержание по массе, %
Металлический порошок	90
ПОМ	9
ПВД	1
Стеариновая кислота	1% от общей массы связки

Данные соотношения были получены эмпирическим путем. Приготовленная смесь обладает необходимой вязкостью для получения изделий при максимальной загрузке металлического порошка.

2.2 Методика проведения эксперимента

Одна из определяющих характеристик термопластичных шликеров – это показатель текучести расплава (ПТР), что соответствует английскому meltmass-flowrate (MFI). Значение ПТР характеризует вязкость расплава при стандартном значении нагрузки для данного материала. Согласно ГОСТ11645-73 (зарубежные аналоги ISO 1133и ASTM 1238), ПТР соответствует массе материала, г, экструдированного из прибора в течение 10 мин при заданной температуре и давлении.

Измерения производились на установке ИИРТ – 5М. Прибор для измерения показан на рисунке 2.6.

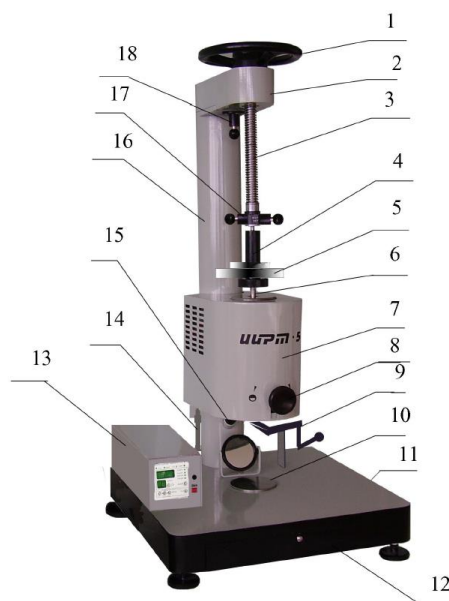


Рисунок 2.6 – ИИРТ-5м

Для измерения ПТР использовался капилляр диаметром 2,095мм, длиной 8 мм, согласно ГОСТ11645-73. Первым делом капилляр закрепляется с помощью держателя 8. Далее термостатируемый цилиндр 7 разогревается до рабочей температуры термопластичного шликера 190 °С. После стабилизации температуры, в цилиндр загружаются гранулы термопластичного шликера и выдерживаются в течение 15 минут для равномерного прогрева материала. Затем устанавливается комплект грузов 5 общей массой 21,6 кг на держатель 4. Проворачивая влево до щелчка, фиксатор привода 18, освобождается штурвал 1. Вращение штурвала против часовой стрелки, приводит в движение поршень 6. Поршень вводится в цилиндр 7 и с его помощью выдавливается одна треть массы расплава. Далее, поднятием вверх до упора держателя грузов и, вращая штурвал по часовой стрелке, приподнимается цанга 17. При этом поршень с грузом освобождается и происходит нагружение материала, создавая необходимое давление на металлическую смесь.

С помощью устройства среза 9, каждую минуту отделялся выдавленный отрезок материала. Для набора статистических данных, было получено 3 отрезка материала. Была определена масса каждого отрезка на весах с точностью до 0,005

г и рассчитано среднее значение. Поскольку показатель текучести расплава определяется количеством материала, выдавленного в течение десяти минут, то полученный результат увеличили в десять раз.

Следующая исследуемая характеристика термопластичного шликера – вязкость, которая влияет на качество литых заготовок, полученных при ЛПД на термопластавтоматах. Это – один из главных параметров, который закладывается в математические модели, описывающие течение смеси при прессовании. Зная характер вязкого течения, можно назначить оптимальные режимы работы термопластавтомата, обеспечивающие получение литых заготовок с заданными служебными свойствами при минимальных энергозатратах.

Определение зависимости вязкости от скорости сдвига исследовано на капиллярном реометре Advanced Capillary Rheometer RH10 фирмы Malvern, рисунок 2.7.



Рисунок 2.7 – Капиллярный реометр

В программном продукте Flowmaster Control, который является управлением капиллярного реометра, вводятся все необходимые параметры для измерения. В первую очередь устанавливается рабочая температура материала в трех зонах рабочей камеры: верхняя часть 170 °С, средняя часть 180 °С и область капилляра

190 °С. После того, как температура в камере достигла заданных значений и стала стабильной, устанавливается капилляр диаметром 1 мм и длиной 8 мм. Затем задаются необходимые параметры проведения эксперимента:

- а) Предварительный тест в виде предварительного сжатия давлением 5 МПа и прогрева в сжатом состоянии в течение 5 минут.
- б) Подтверждение заданных температур.
- в) Подтверждение выбранного капилляра.
- г) Выбор режима расчета (один капилляр, нескорректированный)
- д) Подтверждение используемого датчика давления.
- е) Задание пути эксперимента (минимальное значение скорости сдвига $10(\text{с}^{-1})$, максимальное значение скорости сдвига $4500(\text{с}^{-1})$, количество точек на этом промежутке 10, направление эксперимента - прямое, с возрастанием скорости сдвига).

После установки всех необходимых параметров термопластичный шликер загружается в рабочую камеру. Камера заполняется минимум на 80-90 % от общего объема. После того, как материал расплавился, и температура камеры и капилляра достигли рабочих значений, устанавливается шток и запускается программа реометра. Данные в реальном времени отображаются в окне программы в виде зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига. После завершения эксперимента результат сохраняется в виде таблицы данных.

2.3 Результаты эксперимента

В качестве исходного материала, для сравнения, был выбран термопластичный шликер немецкой фирмы BASF марки Catamold 42CrMo4 (по стандарту AISI/SAE это марка термопластичного шликера 4140). В таблице 2.5 указан химический состав металлического порошка 42CrMo4.

Таблица 2.5 – Химический состав металлического порошка 42CrMo4

Материал	C, %	Cr, %	Mo, %	Fe, %
42CrMo4	0,35 - 0,41	0,9 – 1,2	0,15 – 0,30	Баланс

По химическому составу металлический порошок 42CrMo4 является аналогом 40ХМА [77]. В основе термопластичного шликера Catamold 42CrMo4 используется порошок 42CrMo4. Данная смесь широко распространена в странах Европы, Азии и используется в больших объемах для получения ответственных изделий. [78-80].

2.3.1 Исследование прочностной характеристики образцов из 42CrMo4 и 40ХМА

Для определения прочностных характеристик образцов, полученных из разработанного термопластичного шликера на универсальной электромеханической разрывной машине марки FP-10, была проведена серия экспериментов. Следует отметить, что размеры образца, рисунок 2.8, соответствуют американскому стандарту по МИМ-технологиям ISO 2740, а методика испытаний по ГОСТ 1497-84.

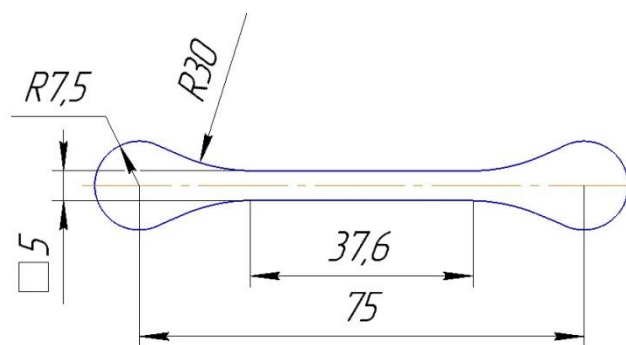


Рисунок 2.8 – Образец для исследования механических свойств

Механические свойства образцов определялись при статистических условиях нагрузки. В процессе плавного нарастания нагрузки на образец. Результаты нагрузки от времени и схема нагружения представлены на рисунке 2.9.

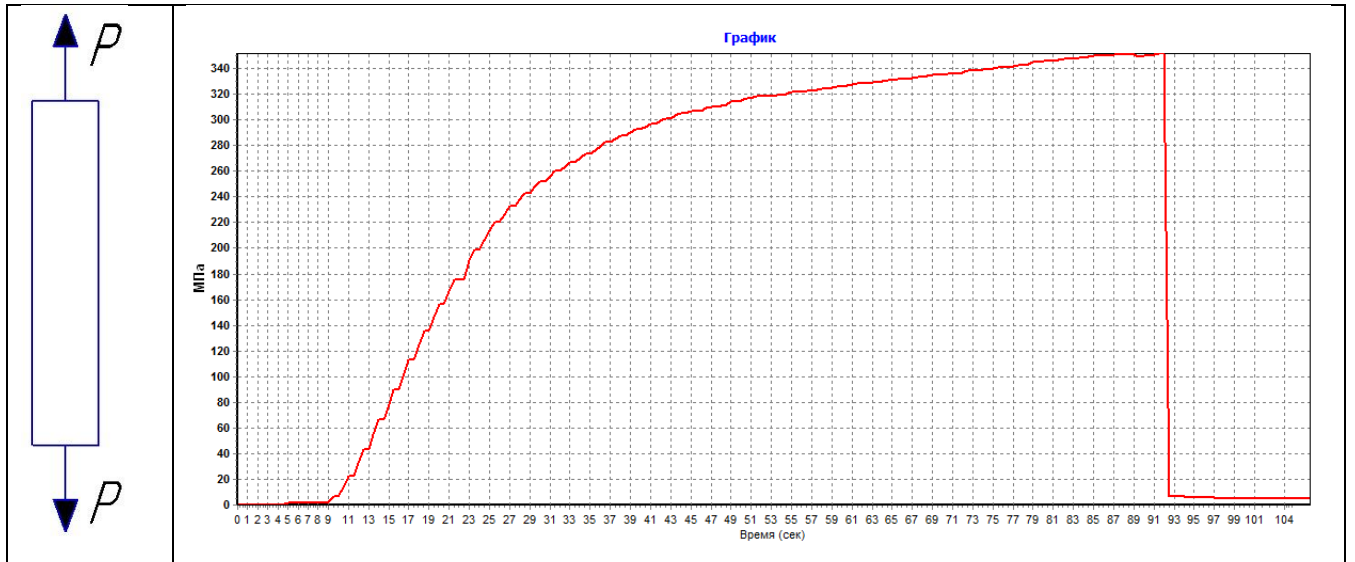


Рисунок 2.9 – Схема нагружения и кривая нагружения

Результаты экспериментов показали, что предел прочности (временного сопротивления) образцов, изготовленных из термопластичного шликера 40ХМА, не превышает 360 – 400 МПа. Это составило порядка 70% от значения, которое приводит фирма BASF для шликера 42CrMo4 [81-83]. Если все же появится потребность в повышении предела прочности, то следует предусмотреть термообработку изготовленных деталей (по данным той же фирмы BASF, предел прочности после термообработки увеличивается более чем вдвое).

2.3.2 Определение показателя текучести расплава (ПТР)

Значение ПТР в эксперименте определяли при тех же параметрах, которые использует фирма BASF. Для сравнения, значение ПТР определяли при температурах 180, 190 и 200°C для двух марок термопластичных шликеров – Catamold 42CrMo4 и на основе стали 40ХМА. Результаты экспериментов показаны в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Показатели текучести расплавов

Материал	Температура, С°		
	180	190	200

	Индекс текучести, г/ 10 мин		
42CrMo4	253	400	516
40XMA	243	285	408

Для термопластичного шликера Catamold 42CrMo4 полученные значения ПТР находятся в пределах технических характеристик, приводимых фирмой BASF [82,83]. При температуре 190 °С фирмой BASF для Catamold 42CrMo4 указано значение ПТР, равное 350 и допустимый разброс значений ПТР в диапазоне 200 – 500. Сравнивая данные таблицы 2.5, можно отметить снижение ПТР для термопластичного шликера на основе стали 40XMA, что может быть связано, в частности, с увеличением размера частиц порошка.

Полученные значения ПТР при различных температурах использовались для построения зависимости натурального логарифма ПТР и обратной температуры, которые представлены на рисунке 2.10.

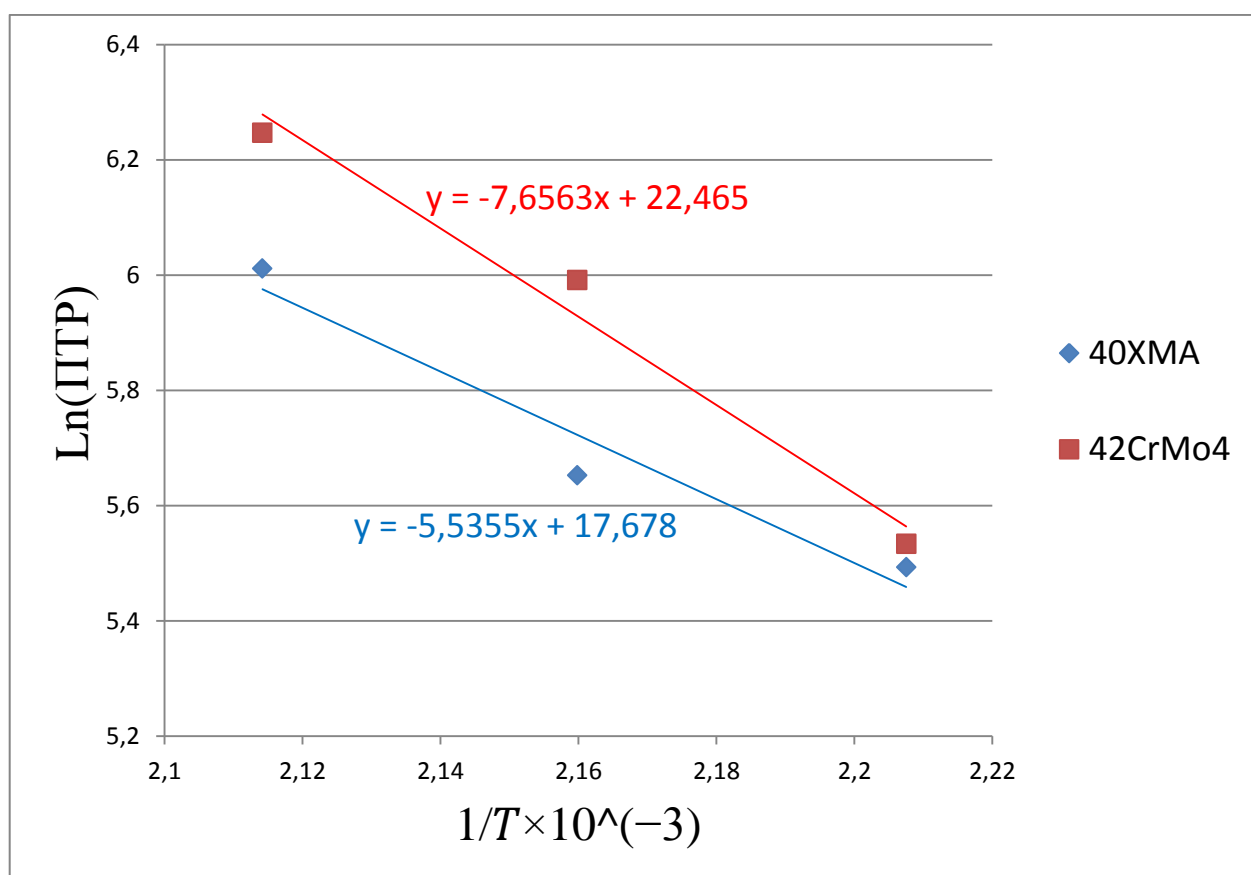


Рисунок 2.10 – ПТР при различных температурах

Полученные зависимости аппроксимировали и привели к линейному виду. Наклон аппроксимирующих прямых позволяет определить энергию активации течения термопластичных шликеров, используя уравнение Аррениуса:

$$k(T) = A \cdot e^{-\frac{E_A}{RT}} \quad (2.3)$$

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.

Приведем уравнение 2.1 к линейному виду:

$$\ln(k) = -\frac{E_A}{R} \cdot \frac{1}{T} + \ln(A) \quad (2.4)$$

или в общем виде

$$y(x) = ax + b \quad (2.5)$$

Из этого следует, что коэффициенты a и b равны:

$$a = -\frac{E_A}{R}, \quad (2.6)$$

$$b = \ln(A), \quad (2.7)$$

a аргумент x

$$x = \frac{1}{T}. \quad (2.8)$$

С математической точки зрения энергия активации – это произведение тангенса угла наклона прямой и универсальной газовой постоянной [84-88]. В таблице 2.7 приведены результаты рассчитанных значений энергии активации для термопластичных шликеров Catamold 42CrMo4 и 40ХМА.

Таблица 2.7 – Энергия активации Catamold 42CrMo4 и 40ХМА

Марка шликера	Catamold 42CrMo4	40ХМА
E_a , кДж\моль	64	46

Как физический параметр, энергия активации показывает степень зависимости вязкости от температуры. Чем больше значение энергии активации, тем более чувствителен материал к температуре [87,88]. Эксперименты показали, что материал 40ХМА имеет меньшую энергию активации, чем зарубежный аналог Catamold 42CrMo4. Поэтому, небольшие колебания температуры и давления в процессе формования изделия на ТПА приводят к резкому изменению вязкости, но не приведут к концентрации напряжений, трещин и искажений в отливаемой детали.

2.3.3 Определение вязкости шликера

Результаты экспериментов по изучению вязкости при рабочей температуре 190 °С показаны на рисунке 2.11.

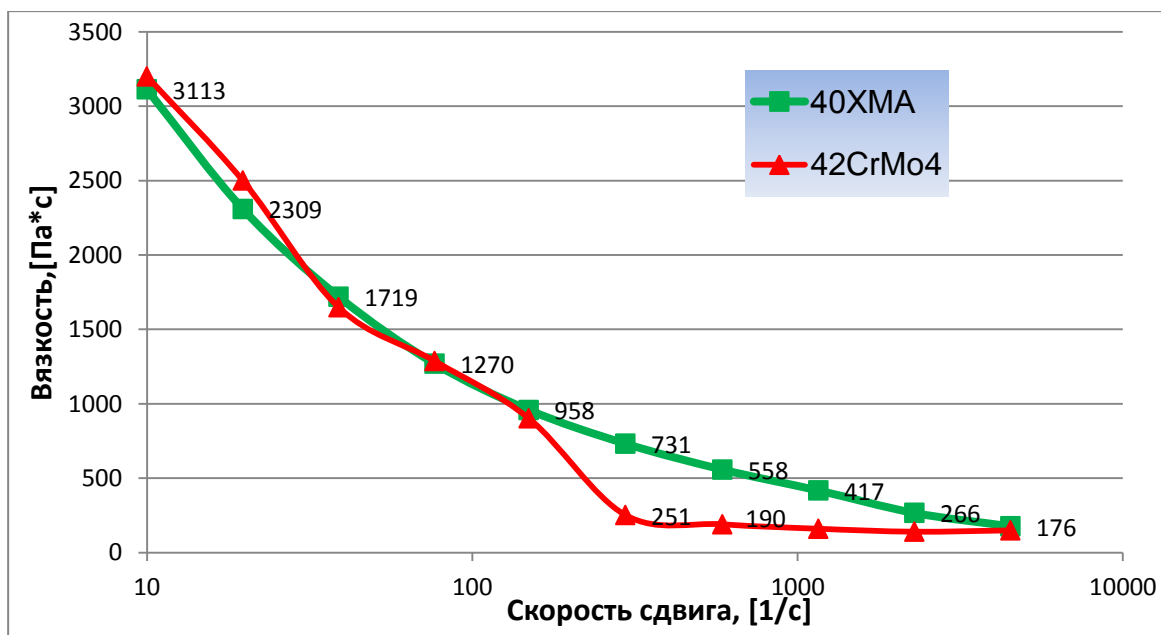


Рисунок 2.11 – Вязкость термопластичных шликеров

Анализ кривых показывает примерное сходство в реологическом поведении двух термопластичных шликеров. Только в диапазоне скоростей сдвига 500...1000 наблюдается более резкое падение вязкости у Catamold 42CrMo4, чем у стали 40ХМА. Видим, что в исследованном диапазоне скоростей сдвига вязкость

расплава обоих термопластичных шликеров снижается более чем в 6 раз, и если при низких скоростях сдвига вязкости близки, то по достижении скорости 100 с^{-1} для материала Catamold 42CrMo4 наблюдается более интенсивное снижение вязкости, что может свидетельствовать о разрушении структуры в расплаве.

Характер кривых на рисунке 2.9 показывает, что термопластичные шликеры можно отнести к неньютоновским жидкостям [89-92] (напряжения сдвига не пропорциональны скоростям сдвига), обладающим свойством тиксотропии (вязкость уменьшается с увеличением скоростей сдвига). Можно выделить три характерные области на этих кривых. В первой области, с малыми скоростями сдвига, имеет место ньютоновское поведение смеси. Вторая область – нелинейное уменьшение вязкости, и третья область – область повторного ньютоновского поведения.

Для описания этих особенностей предложен целый ряд моделей. Как показал литературный обзор, наиболее подходящей моделью для описания вязкости от скорости сдвига является модель Карро и Яшида с поправочными коэффициентами:

$$\eta(\gamma) = \frac{\eta_0 \cdot E - \eta_\infty}{\lambda_{00} + [\lambda_0 + (\lambda_1 \cdot E)^2 \cdot \gamma^2]^{\frac{(1-n)}{2}}} + \frac{\lambda_2}{\sqrt{\gamma^2}} \quad (2.9)$$

где η – эффективная вязкость, Па*с;

γ – скорость сдвига, с-1;

η_0 – наибольшая ньютоновская вязкость, Па*с;

η_∞ – 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, который по формуле 1.39

$$E = \exp \left[a \cdot \left(\frac{T^*}{T - b} - c \right) \right] \quad (2.10)$$

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

T – температура шликера, К;

a, b и c – эмпирические постоянные.

Выбранная модель позволяет описывать течения термопластичных шликеров в широком диапазоне скоростей сдвига, в том числе вязкость при нулевой скорости сдвига [93-97], а наличие дополнительного температурного коэффициента расширяет область применения данного уравнения, позволяя следить за изменением вязкости при изменении температуры.

2.3.4 Определение коэффициентов реологической модели вязкого течения

Для математического описания полученной зависимости вязкости от скорости сдвига необходимо рассчитать коэффициенты для модели Карро. Для более точного определения коэффициентов был выбран пакет программ MatLab. Исходные экспериментальные точки, которые загружались в MatLab, представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Экспериментальные данные

Параметры	Значения									
Вязкость, Па*с	3113	2309	1719	1270	958	731	558	417	266	176
Скорость сдвига, 1/с	10	19,71	38,86	76,63	149,34	295,98	587,73	1159,36	2288,95	4511,45

Данные значения были получены на капиллярном реометре Advanced Capillary Rheometer RH10 фирмы Malvern.

Рассчитанные коэффициенты для уравнения Карро и Яшида представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Рассчитанные коэффициенты уравнения Карро и Яшида

Обозначение	Значение
η	Y
γ	X
	скорость сдвига, с-1

η_0	- эффективная вязкость, Па*с наибольшая ньютоновская вязкость, Па*с	11000
η_∞	- наименьшая ньютоновская вязкость, Па*с	-197,425
λ_{00}	- эмпирические постоянные	-5,817
		1340,513
λ_0		660,04
λ_1		1967
λ_2		
n	- эмпирическая постоянная от 0 до 1	0,697
E	- температурный коэффициент	Z

Коэффициенты для поправочного температурного коэффициента представлены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Рассчитанные поправочные температурные коэффициенты уравнения Карро и Яшида

Обозначение		Значение
T^*	- значение температуры, после которой начинается учет зависимости параметров модели от температуры, К	273
T	- температура шликера, К	T
a	- эмпирические постоянные	0,575
b		200
c		-1,737

Определим вязкость, используя уравнение Карро и рассчитанные коэффициенты при известных скоростях сдвига. Полученные значения представлены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Рассчитанные значения вязкости

Параметры	Значения									
Вязкость, Па*с	3108,93	2314,45	1722,95	1282,61	959,61	712,61	528,96	393,63	292,88	218,04

Для графического анализа зависимости вязкости от скорости сдвига построим экспериментальную и расчетную кривую, рисунок 2.12.

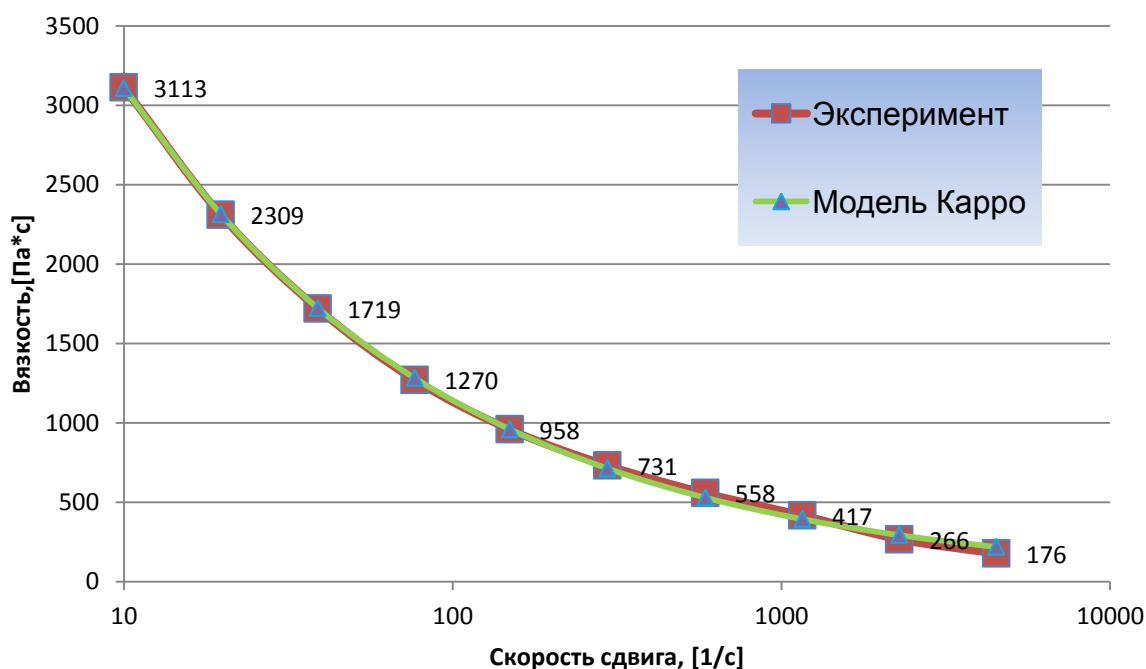


Рисунок 2.12 – Экспериментальная и расчетная зависимости

Для оценки качества подбора уравнения регрессии рассчитаем коэффициент детерминации по формуле [72]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^k (y_i - \bar{y}_i)^2} = 1 - \frac{4441,0407}{8365092,1} = 0,99946 \quad (2.11)$$

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

y_i – экспериментальное значение вязкости (таблица 2.7);

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

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

Коэффициент детерминации – это доля дисперсии зависимой переменной, объясняемая рассматриваемой моделью зависимости, то есть объясняющими пе-

ременными. Более точно – это единица минус доля необъяснённой дисперсии (дисперсии случайной ошибки модели, или условной по факторам дисперсии зависимой переменной) в дисперсии зависимой переменной. Его рассматривают как универсальную меру связи одной случайной величины от множества других.

Выводы по второй главе

1. Термопластичный шликер ведет себя, как упруго-вязко-пластическое тело и обладает тиксотропными свойствами;
2. Для математического описания зависимости вязкости от скорости сдвига можно использовать модель Карро с рассчитанными коэффициентами;
3. Эксперименты показали, что термопластичный шликер 40ХМА имеет меньшую энергию активации, чем зарубежный аналог 42CrMo4. Поэтому небольшие колебания температуры и давления в процессе формования изделия на ТПА не приведут к концентрации напряжений, трещин и искажений в отливаемой детали.
4. Основные физические и механические свойства разработанного состава термопластичного шликера практически не уступают свойствам зарубежного аналога.
5. Создание отечественных составов термопластичных шликеров позволит не только снизить зависимость от импортных поставок исходных материалов, но и добиться получения деталей с уникальными служебными свойствами, расширить их номенклатуру и снизить себестоимость их производства.
6. Снижение механических свойств термопластичного шликера 40ХМА связаны с увеличением размера металлического порошка в смеси.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛИТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЛИТЬЯ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ШЛИКЕРА

Для моделирования литейных процессов используется пакет программ FLOW– 3D. Выбранный пакет программ предоставляет средства моделирования течений для исследования динамики поведения жидкостей, шликеров и газов в широком диапазоне промышленных приложений и физических процессов.

В нашем случае программа позволяет учитывать упруго-вязко-пластическое течение термопластичного шликера по задаваемой реологической модели. Исследовать изменения вязкости термопластичного шликера в процессе течения по каналам литниковой системы и полости формы при воздействии различных параметров на неё. Такие как, температура самого термопластичного шликера, давление или скорость в канале, геометрическая форма канала и другие параметры.

Любой пакет программ требует проверки на адекватность воспроизведения результатов и точности расчетов. Адекватность работы программного пакета позволит при меньших временных и финансовых затратах моделировать различные технологические задачи с целью выявления оптимальных решений и снижения брака в производстве. Используя возможности выбранного пакета программ, можно будет исследовать особенности течения шликера, и сделать рекомендации по расчету литниковой системы для обеспечения бездефектного заполнения полости формы.

Для описания вязкопластического поведения шликера в пакете FLOW– 3D по умолчанию заложена модель, которая является разновидностью моделей Бингама – Шведова. На рисунке. 3.1 представлена реологическая схема модели Бингама – Шведова.

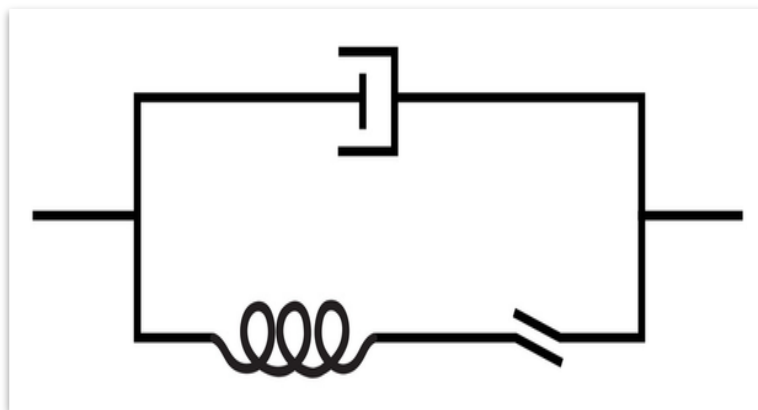


Рисунок 3.1 – Модель Бингама-Шведова

Эта модель состоит из трех элементов: последовательно соединенных упругого и пластического тел в параллель с вязким телом. Данная модель и использовалась в дальнейших расчетах.

3.1 Проверка модели течения на адекватность

3.1.1 Течение шликера по цилиндрическому каналу

Для описания установившегося течения вязкой жидкости в цилиндрическом канале используется закон Гагена-Пуазейля. Данный закон говорит о том, что объёмный расход жидкости прямо пропорционален перепаду давления на единицу длины трубы, четвёртой степени радиуса и обратно пропорционален коэффициенту вязкости жидкости [98-103].

Закон Гагена-Пуазейля:

$$Q = \frac{\pi \cdot \Delta p \cdot r^4}{8l\eta} \quad (3.1)$$

где Δp – перепад давления на концах трубы;

r – радиус трубы;

l – длина трубы;

η – вязкость жидкости.

Для проверки на правильность работы выбранного пакета программ для моделирования рассмотрим течение жидкости в цилиндрическом канале диаметром 4 мм. Рассчитаем изменения давления в каналах разной длины 10, 15 и 25 мм. Вязкость шликера примем постоянной 3000 Па·с. Согласно экспериментальной кривой исследования вязкости это значение близко к максимальному. Рабочее значение расхода смеси примем $10 \frac{\text{см}^3}{\text{с}}$.

Рассчитаем давление в каналах по закону Гагена-Пуазейля:

$$\Delta p = \frac{Q8l_1\eta}{\pi \cdot r^4} = \frac{0,00001 \cdot 8 \cdot 0,01 \cdot 3000}{\pi \cdot 0,002^4} = 47,96 \cdot \text{МПа}$$

$$\Delta p = \frac{Q8l_2\eta}{\pi \cdot r^4} = \frac{0,00001 \cdot 8 \cdot 0,015 \cdot 3000}{\pi \cdot 0,002^4} = 71,94 \cdot \text{МПа}$$

$$\Delta p = \frac{Q8l_3\eta}{\pi \cdot r^4} = \frac{0,00001 \cdot 8 \cdot 0,025 \cdot 3000}{\pi \cdot 0,002^4} = 119,9 \cdot \text{МПа}$$

Исследуем изменение давления в таких же каналах, используя пакет программ. В первую очередь определимся с начальными условиями течения шликера. Определим среднюю скорость потока материала в цилиндрическом канале 4 мм. Для этого рассчитаем площадь поперечного сечения канала:

$$s = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,004^2}{4} = 0,00001256 \text{ м}^2 \quad (3.2)$$

где D – диаметр канала.

Средняя скорость в канале равна:

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{0,00001}{0,00001256} = 0,796 \text{ м/с} \quad (3.3)$$

где Q – объемный расход;

s – поперечная площадь канала.

Примем среднюю скорость расплава 0,8 м/с и установим на входе в канал. Моделирование в пакете программ определило, что в каналах длиной 10, 15 и 25 мм давление 50,9; 68,3 и 103,8 МПа соответственно. Давление в канале возрастает по мере его заполнения. На рисунке 3.2 показано распределение давления в цилиндрическом канале диаметром 4 мм на длине 15 мм.

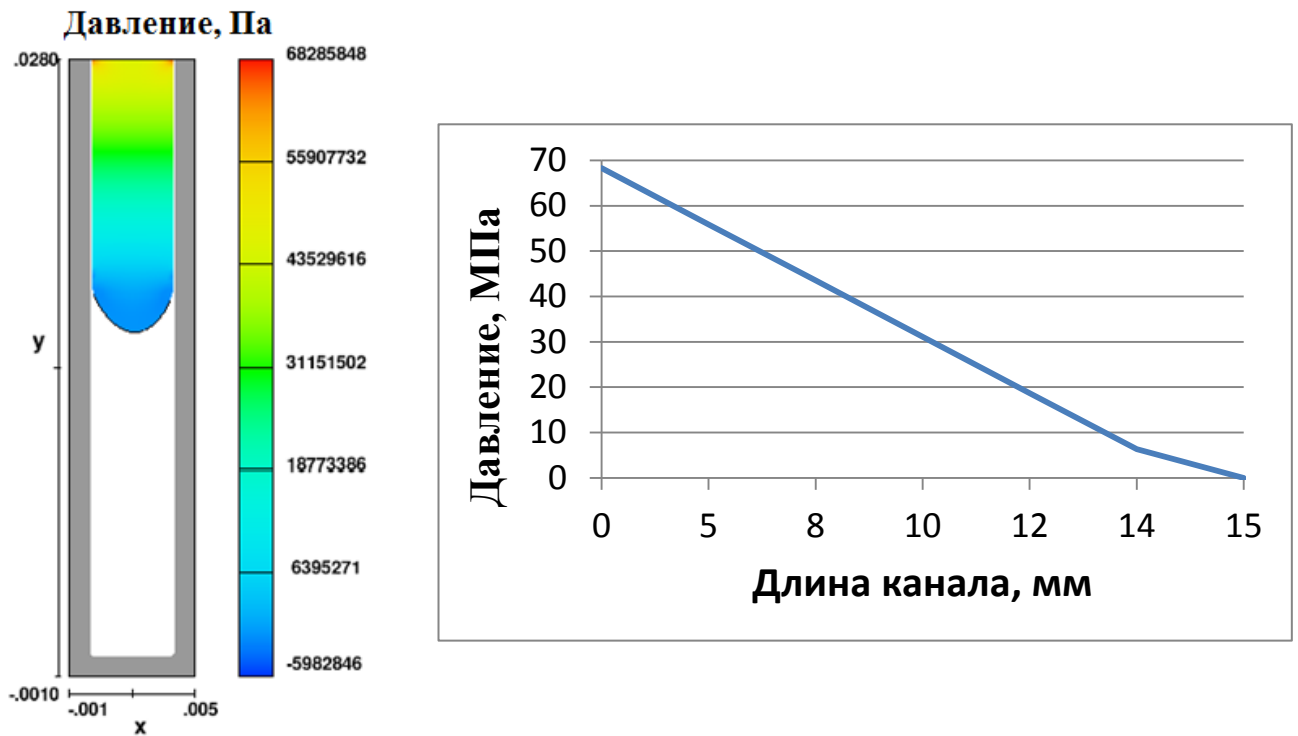


Рисунок 3.2 – Распределение давления в цилиндрическом канале

Результаты расчета давления по закону Гагена-Пуазейля и моделирование в пакете программ Flow 3D представлены на рисунке 3.3 в виде гистограммы.

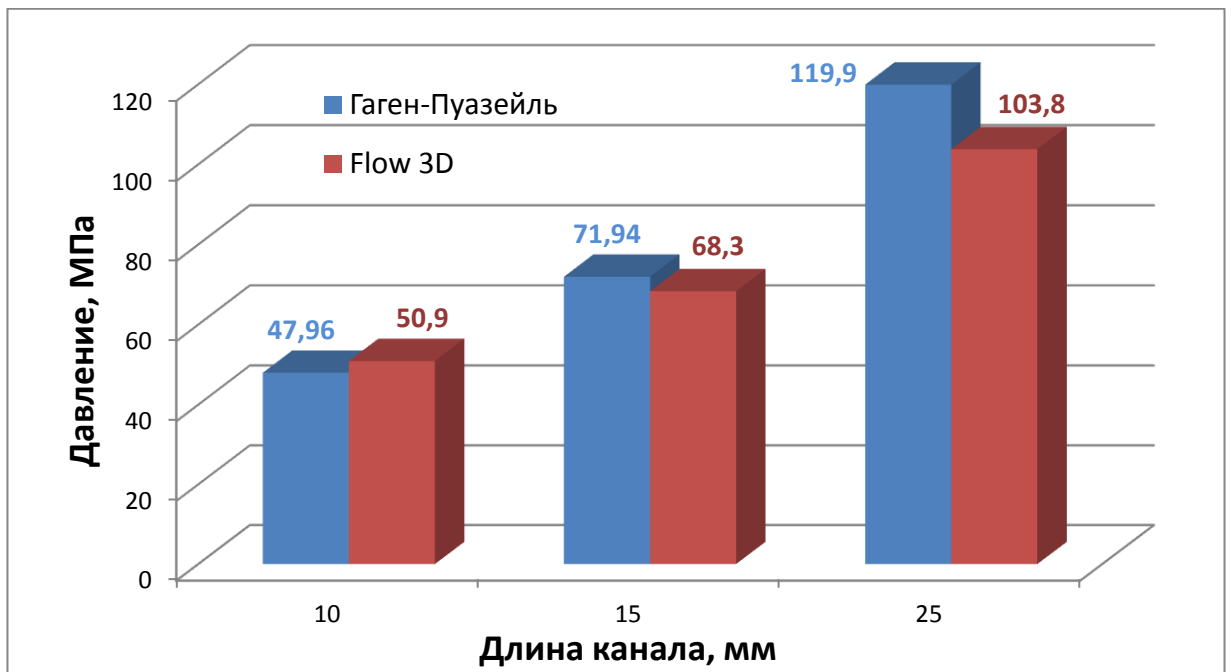


Рисунок 3.3 – Давление в каналах разной длины

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 %.

Рассмотрим изменение давления в канале 15 мм при различных вязкостях шликера 3000, 1500, 100 и 1 Па·с. Все остальные параметры оставим неизменными. Рассчитаем давление по закону Гагену-Пуазейлю:

$$\Delta p = \frac{Q8l\eta}{\pi \cdot r^4} = \frac{0,00001 \cdot 8 \cdot 0,015 \cdot 3000}{\pi \cdot 0,002^4} = 71,94 \cdot \text{МПа}$$

$$\Delta p = \frac{Q8l\eta}{\pi \cdot r^4} = \frac{0,00001 \cdot 8 \cdot 0,015 \cdot 1500}{\pi \cdot 0,002^4} = 35,97 \cdot \text{МПа}$$

$$\Delta p = \frac{Q8l\eta}{\pi \cdot r^4} = \frac{0,00001 \cdot 8 \cdot 0,015 \cdot 100}{\pi \cdot 0,002^4} = 2,4 \cdot \text{МПа}$$

$$\Delta p = \frac{Q8l\eta}{\pi \cdot r^4} = \frac{0,00001 \cdot 8 \cdot 0,015 \cdot 1}{\pi \cdot 0,002^4} = 0,024 \cdot \text{МПа}$$

Рассмотрим изменение давления при различной вязкости шликера на длине канала 15 мм в пакете программ. Полученные значения давления занесем в гистограмму на рисунке 3.4 и сравним их со значениями расчета.

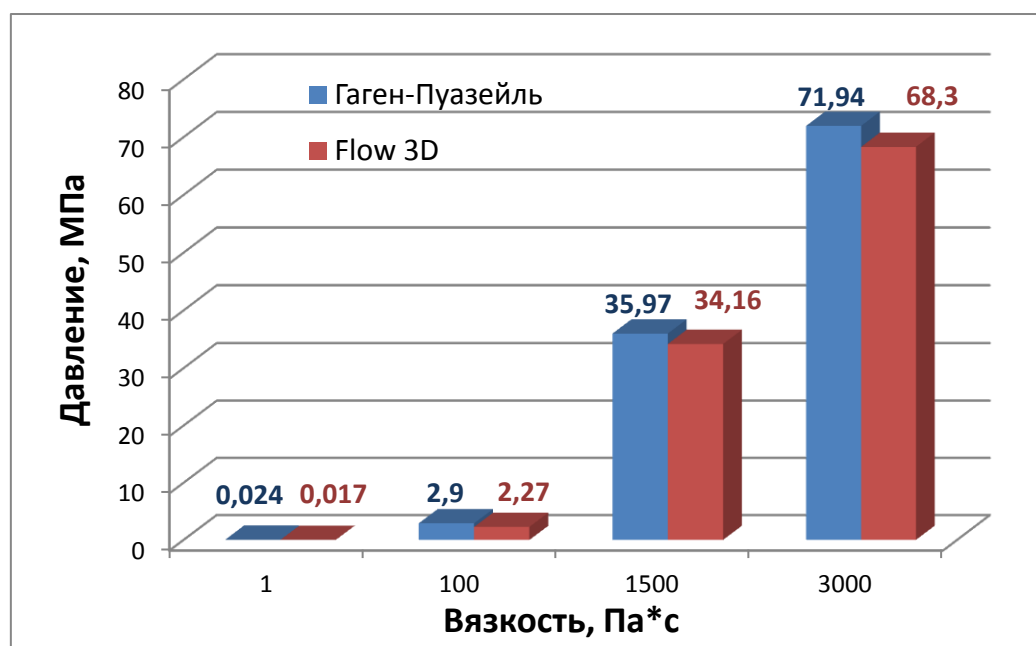


Рисунок 3.4 – Давление в канале при различной вязкости

Расчетные значения давления в пакете программ и по закону Гагена-Пуазейля совпадают, что дает основание считать заложенную модель течения адекватной.

3.1.2 Свободное течение термопластичного шликера из сопла машины литья под давлением

Для проверки моделирования пакета программ Flow–3D на соответствие характера течения шликера был реализован процесс заполнения прозрачной формы свободной струей. На рисунке 3.5 показана экспериментальная установка литья под давлением.

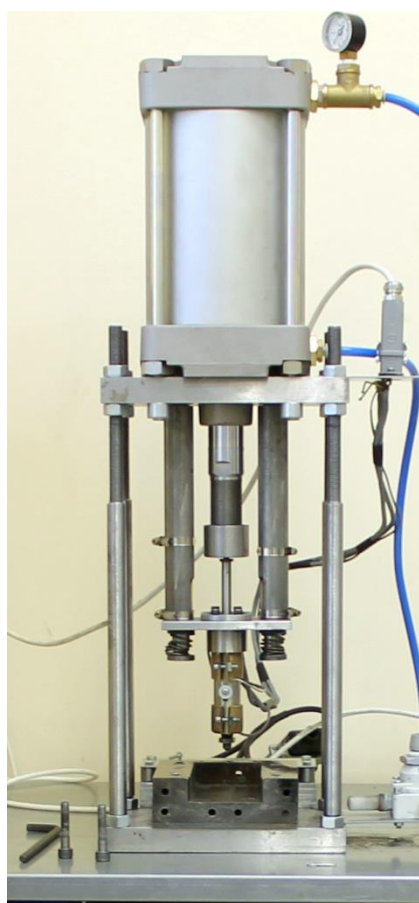


Рисунок 3.5 – Экспериментальная установка литья под давлением

Экспериментальное давление прессования шликера 100 МПа. Шликер марки 40ХМА. Температура шликера в момент выдавливания его из сопла в прозрачную форму 463 К. Этапы заполнения формы представлены на рисунке 3.6.

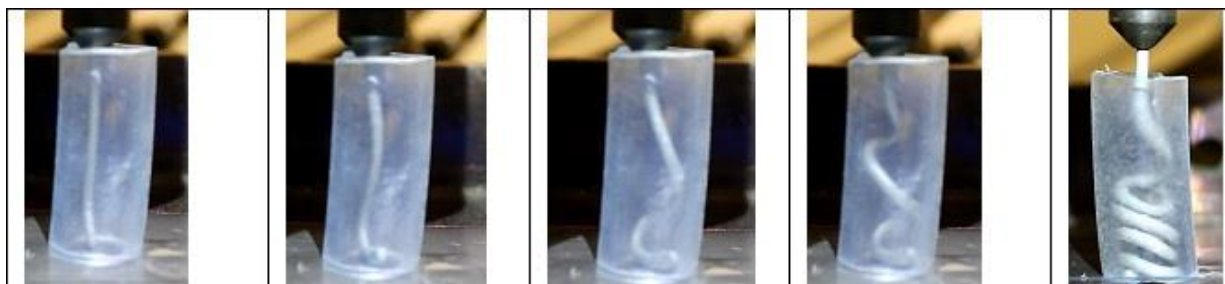


Рисунок 3.6 – Заполнение прозрачной формы шликером

Из эксперимента следует, что струя, выйдя из сопла, сохраняет свою форму и заполняет полость в виде жгута, послойно наматываясь снизу вверх. Данный эксперимент наглядно подтверждает наличие у термопластичного шликера не только вязких, но и упругих и пластических свойств и говорит о сложном характере течения шликера в форме.

Моделирование заполнения канала термопластичным шликером, учитывая только вязкое течение, показано на рисунке 3.7.

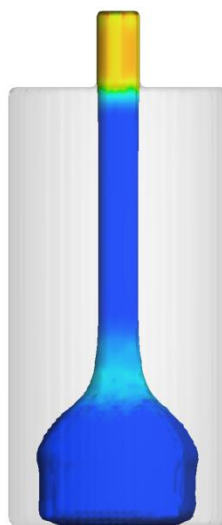


Рисунок 3.7 – Моделирование вязкого течения

Из моделирования только вязкого течения видно, что шликер не сохраняя формы, растекается по каналу, что не соответствует эксперименту. Для воспроизведения реалистичного течения шликера в моделирование необходимо добавить упругопластические свойства по модели Бингама. Из литературных источников [16,20] были выбраны значения модуля сдвига равного $2,9 \times 10^8$ Па и предела текучести $6,53 \times 10^6$ Па. Результаты моделирования показаны на рисунке 3.8.

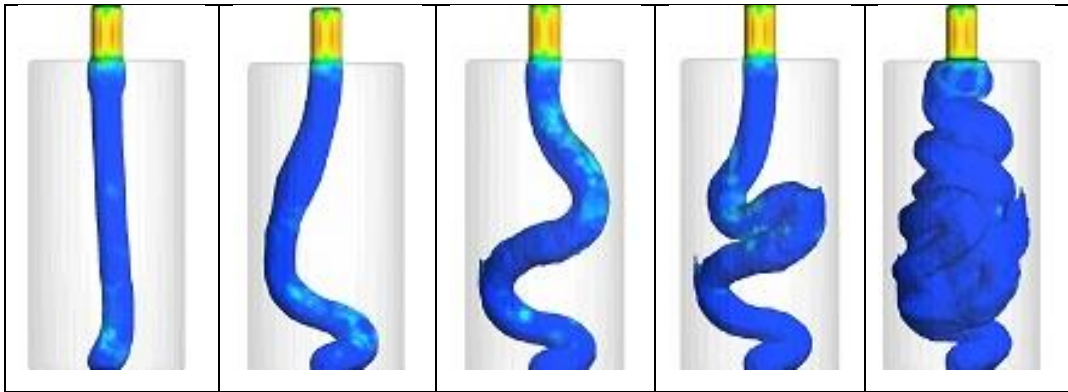


Рисунок 3.8 – Моделирование заполнения формы в пакете FLOW– 3D

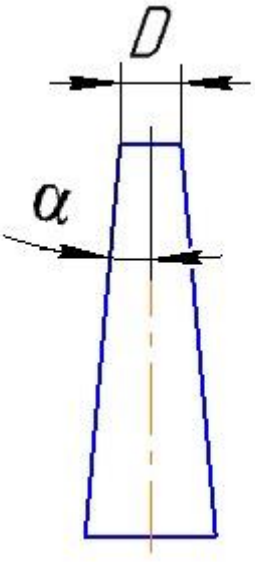
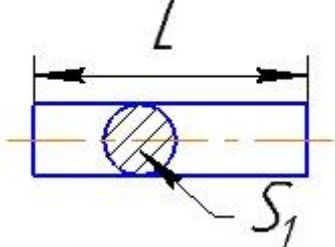
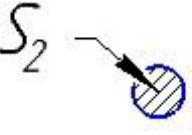
Сравнив результаты моделирования с натурными испытаниями можно говорить о том, что в пакете программ Flow–3D адекватно воспроизводятся основные особенности течения термопластичных шликеров в полости формы. Таким образом, выбранные расчетные схемы, физические модели и исходные значения параметров позволяют адекватно моделировать упруго вязкопластическое течение термопластичных шликеров в полостях пресс-форм при литье под давлением.

3.2 Исследование влияния технологических факторов на течение термопластичного шликера по каналам литниковой системы

В литье под давлением термопластичных шликеров, как правило, литниковая система состоит из трех элементов: центральный литник, разводящие каналы и питатель (впускной литник). Для обеспечения бездефектного заполнения полости формы важно правильно определить параметры элементов литниковой системы. В таблице 3.1 представлены элементы литниковой системы с их параметрами.

Таблица 3.1 – Элементы литниковой системы с параметрами

Элементы литниковой системы	Параметры
Центральный литник	D – диаметр центрального литника на входе; α – угол уклона центрального литника.

	
<p>Разводящий канал</p> 	<p>L – длина разводящих каналов; S_1 – площадь поперечного сечения разводящего канала.</p>
<p>Питатель</p> 	<p>S_2 – площадь поперечного сечения питателя.</p>

Правильный расчет параметров литниковой системы позволит получать отливки без дефектов.

В первую очередь определимся с влиянием технологических факторов на течение шликера в каналах литниковой системы. Как правило, элементы литниковой системы имеют цилиндрическую форму. Поэтому исследования течения шликера будут рассмотрены в цилиндрических каналах разных диаметров. Центральный литник представим в виде цилиндрического канала 4 мм, разводящие каналы 2 мм, а питатель 1 мм.

Параметр вязкости шликера является основополагающим для получения литых заготовок без дефектов. Характеру изменения вязкости шликера и факторам, влияющим на неё, уделено большое внимание во многих работах. В источниках

[90-93] представлены исследование вязкости при различной температуре и переменными скоростями сдвига. Особое внимание уделяется тиксотропности материала и его исследованию, что говорит о том, что не только термодинамические параметры влияют на вязкость материала, но и механические воздействия на неё.

Рассмотрим воздействие на шликер как механических, так и термодинамических параметров. Данные исследования позволят определиться с методами влияния на вязкость шликера, чтобы обеспечивать плавное и бездефектное заполнение формы.

Вязкое течение шликера в пакете программ моделирования описано по реологической зависимости Карро, которая учитывает тиксотропность материала.

3.2.1 Изменение вязкости термопластичного шликера при трении о стенки каналов

Исследование влияния трения о стенки канала на вязкое течение позволит определиться с рекомендациями шероховатости поверхности литниковых каналов. Поскольку шликер обладает тиксотропными свойствами, то дополнительные возмущения течения в виде увеличения шероховатости должны уменьшать вязкость термопластичного шликера. Рассмотрим случаи течения с полным проскальзыванием материала в канале, то есть без прилипания к стенкам, а также с частичным и полным прилипанием.

На рисунке 3.9 представлены значения вязкости по сечению цилиндрического канала диаметром 4 мм с различными условиями прилипания к стенке.

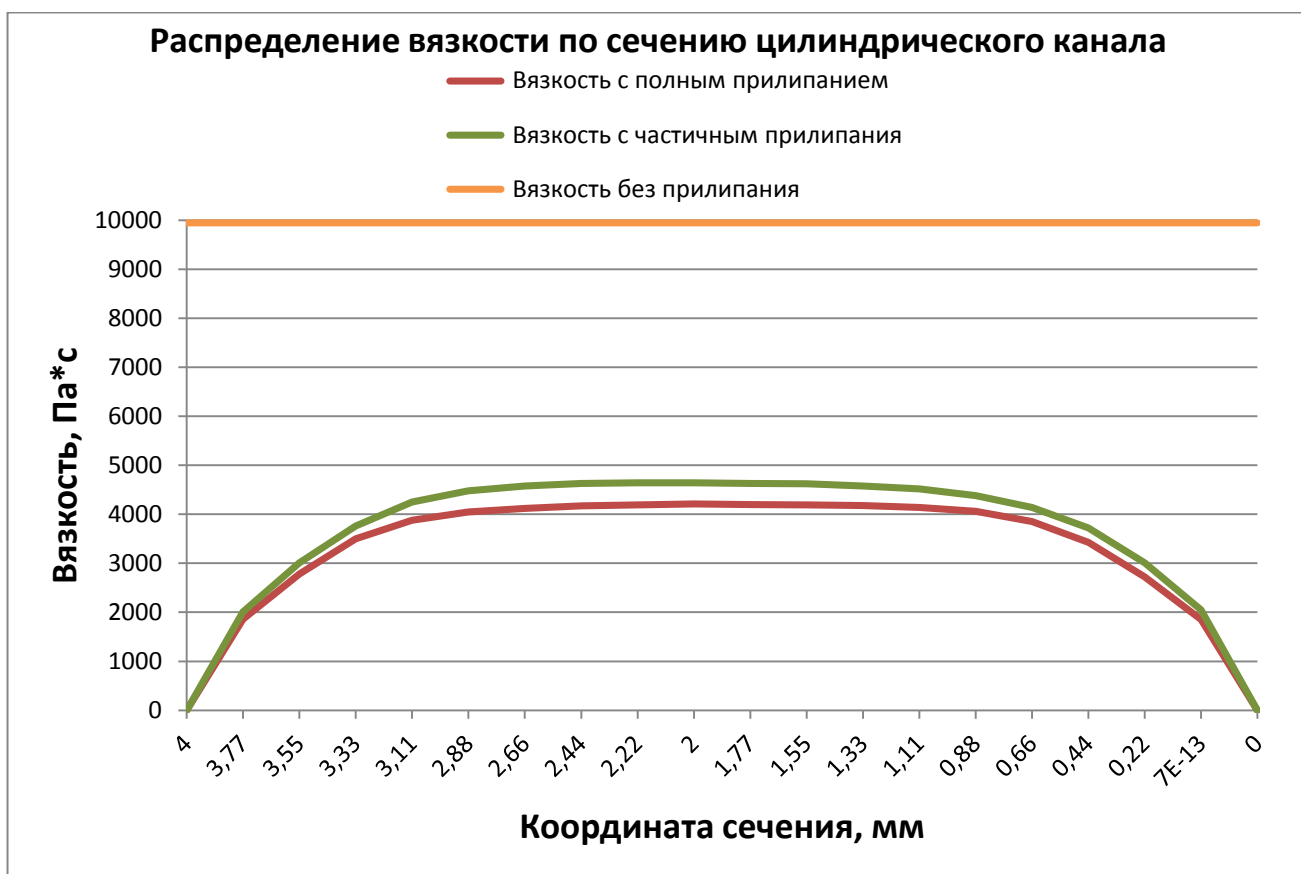


Рисунок 3.9 – Вязкость материала при разных условиях прилипания

Из расчетов видно, что максимальная вязкость шликера в канале без учета трения о стенки. Это связано с отсутствием трения материала о стенки канала, которое приводит к возникновению касательных напряжений.

В расчетах, где учитывается трение видно, что вязкость снижается у стенок канала почти до нуля, поскольку именно там возникают наибольшие касательные напряжения. Условия полного прилипания к стенке снижает вязкость материала больше, чем частичное прилипание.

Моделирование заполнения цилиндрических каналов с разными коэффициентами трения показало, что давление в канале значительно не изменяется. Соответственно, шероховатость канала будет влиять исключительно на качество поверхности, и препятствовать извлечению из полости формы. Каналы литниковой системы необходимо делать с шероховатостью не более 3,2 мкм.

3.2.2 Влияние теплообмена формы и термопластичного шликера на вязкость

С повышением температуры вязкость термопластичного шликера уменьшается и наоборот. Рекомендуемая температура заливки шликера 463 К [20,82,83]. Расплавление шликера происходит в материальном цилиндре машины литья под давлением с помощью нагревателей. Помимо внешнего источника нагрева, который возможно контролировать, материал разогревает в процессе заполнения формы из-за трения. Для оценки существенности нагрева шликера трением промоделируем процесс течения шликера без теплообмена со стенками канала и зафиксируем изменение его температуры. На рисунке 3.10 представлены график изменения температуры в процессе заполнения цилиндрического канала.



Рисунок 3.10 – Изменение температуры шликера в канале за счет трения

Перепад температуры шликера произошел вблизи контакта со стенкой канала и составил 1 К. Полученное значение несущественно по сравнению с перепадом температуры шликера в процессе теплообмена с формой. На рисунке 3.11 показаны графики перепада температуры шликера 463 К при заполнении канала температурой 393 К и 293 К.

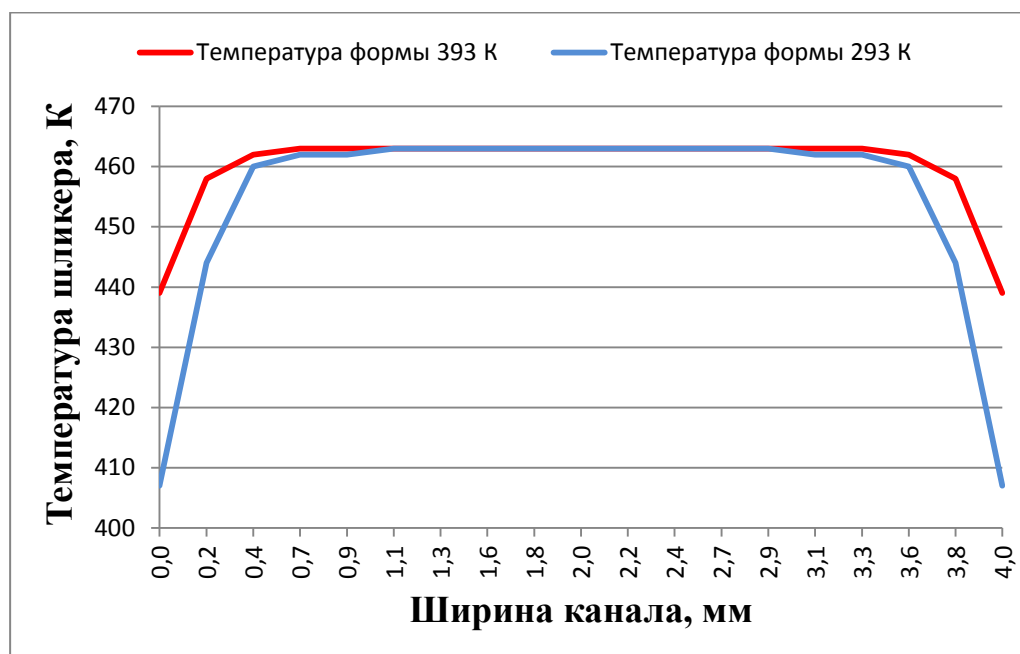


Рисунок 3.11 – Распределение температуры шликера в цилиндрическом канале

Логично было предположить, что заполнение более холодного канала приведет к большей потере температуры шликера, так и произошло. Однако при заполнении канала с температурой 293 К в местах отдаленных от стенки канала на 0,4 мм возникли большие касательные напряжения. На рисунке 3.12 показаны распределения касательных напряжений в каналах с разной температурой.

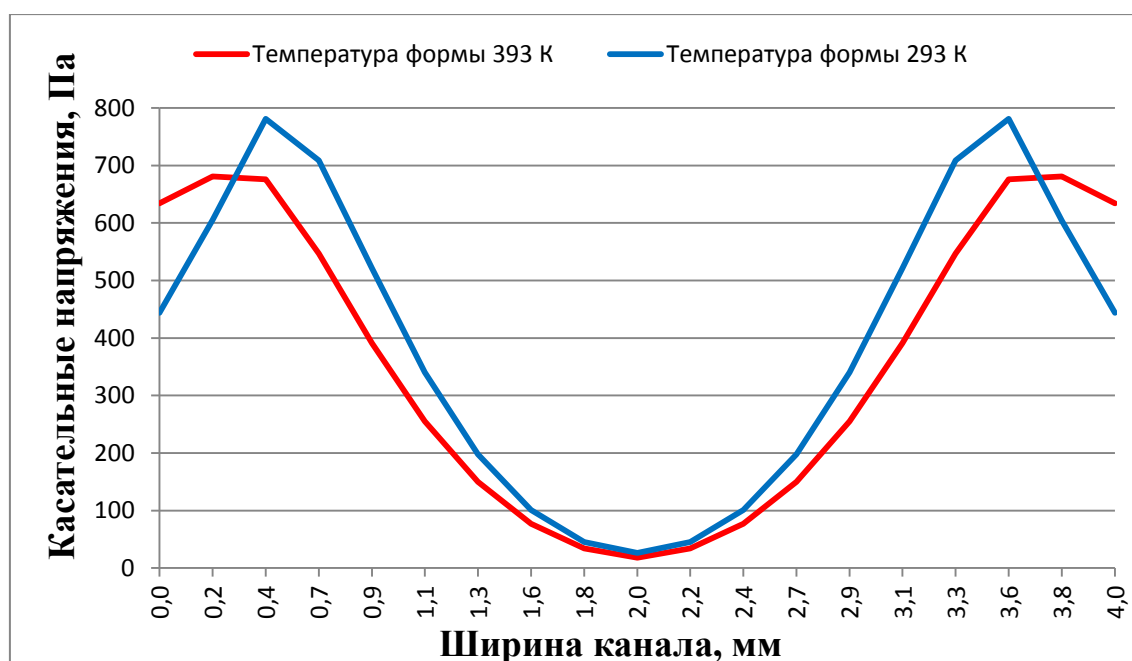


Рисунок 3.12 – Касательные напряжения в цилиндрическом канале

Поскольку шликер обладает тиксотропными свойствами, то увеличение касательных напряжений приведет к снижению вязкости. Рассмотрим влияние температуры канала на изменение вязкости шликера в процессе течения. На рисунке 3.13 представлены распределения вязкости в каналах с разной температурой.

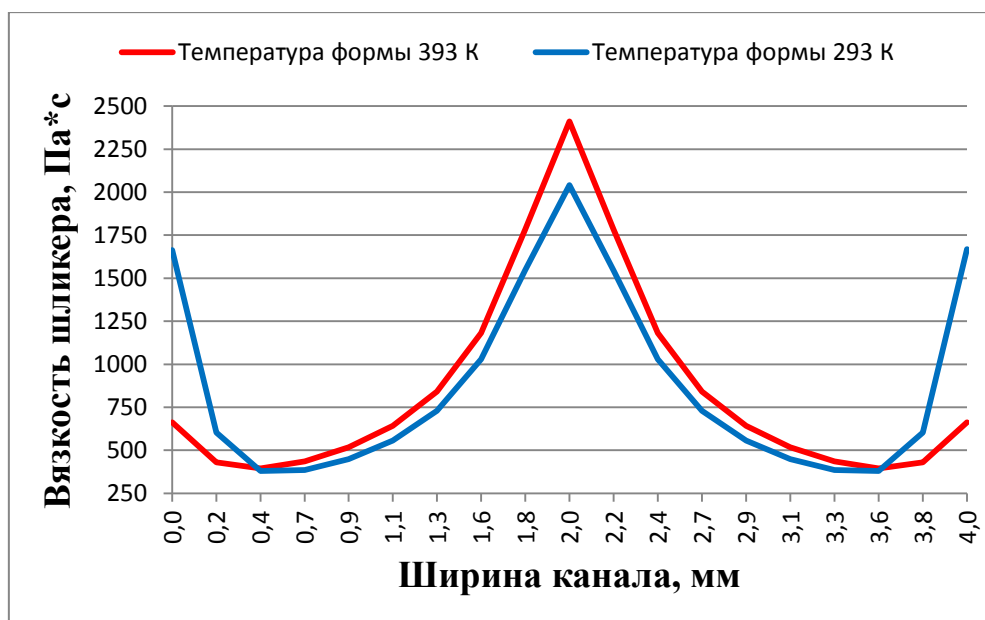


Рисунок 3.13 – Распределение вязкости шликера в каналах разной температуры

Видно, что теплообмен сильно повлиял на вязкость материала в областях непосредственного контакта с формой. Вязкость же в центре потока изменилась незначительно. Это объясняется тем, что в непосредственном контакте со стенкой более холодного канала, шликер теряет температуру до 56 К. Область увеличения касательных напряжений в канале особо не снизила вязкость шликера.

Анализируя полученные результаты моделирования, можно сказать, что для снижения вязкости шликера для плавного заполнения, необходимо задавать температуру формы максимально возможную, но которая позволит отливке в ней затвердевать.

3.2.3 Исследование влияния геометрии каналов литниковой системы на течение термопластичного шликера

3.2.3.1 Конусность и впускной диаметр центрального литника

При литье шликеров под давлением почти во всех случаях происходит образование струи, рисунок 3.14, при входе фронта потока расплава в оформляющую полость, что обусловлено геометрическими факторами и наличием упруговязких свойств.

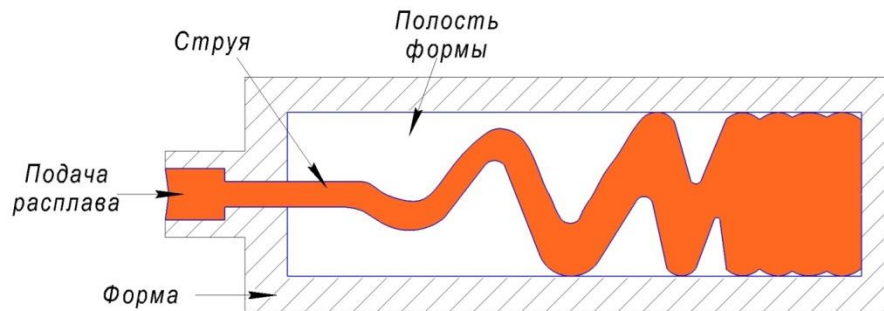


Рисунок 3.14 – Струйное течение

Наибольшая вероятность образования струйного течения в центральном литнике, поскольку шликер, выходя из узкого сопла машины литья под давлением, и попадает в расширяющийся канал литника. Образовавшаяся струя приводит к захвату воздуха в расплав шликера и снижению служебных свойств литой заготовки. На величину струи влияет скорость потока шликера на выходе из сопла и конусность центрального литника, которая необходима для извлечения его из пресс-формы.

Рассмотрим три канала с разной конусностью 1, 3, 5 градусов и промоделируем их заполнение с разным расходом шликера 2,5 и 10 см³/с. Результаты зависимости конусности на величину струи при разных расходах шликера, показаны на рисунке 3.15.

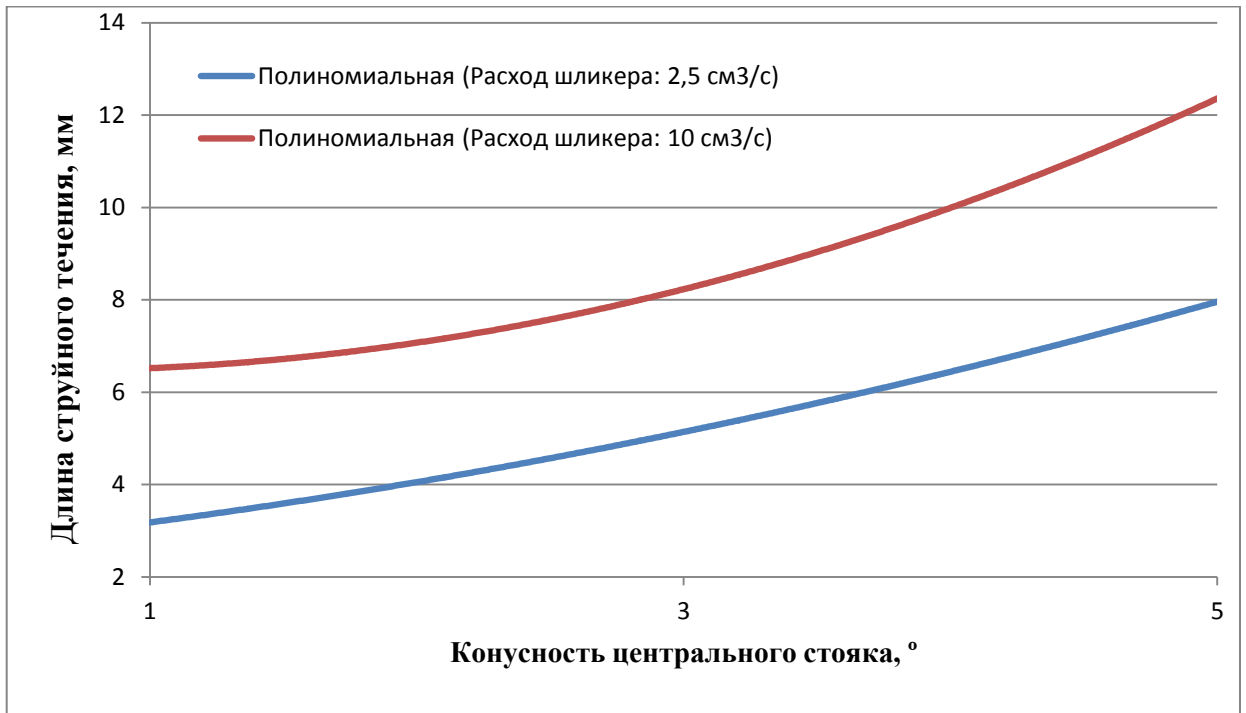


Рисунок 3.15 – Влияние расхода и конусности канала на струйное течение

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. Поток нормализуется после соприкосновения струи со стенкой канала.

Факторы, способствующие соприкосновению потока шликера со стенкой канала, это сила тяжести в горизонтальном канале, неравномерное распределение напряжений или разбухание струи шликера на выходе из более узкого сечения (Барус-эффект) [104]. Из-за высоких скоростей потока и краткости хода параметром силы тяжести пренебрегают. В таком случае рассмотрим процесс разбухания струи при выходе из сопла машины.

Разбухание струи определяется как отношение диаметра струи D' к диаметру канала D . В струе формируется «плоский» профиль линейной скорости течения по толщине струи [105]. При «плоском» профиле линейной скорости течения диссипативное тепловыделение отсутствует, т.к. скорость сдвига равна нулю. Повышение скорости течения может вызывать «запаздывание» разбухания из-за влияния инерции [106-108].

Разбухание струи связывают с первой разностью нормальных напряжений для установившегося изотермического течения и равновесного разбухания [104]:

$$\frac{D'}{D} = \left[1 + \frac{\left(N_1 / \sigma_{\text{макс}} \right)}{8} \right]^{1/6} \quad (3.4)$$

где D' – диаметр струи после выхода из канала;

D – диаметр канала;

N_1 – первая разность нормальных напряжений;

$\sigma_{\text{макс}}$ – максимальное напряжение сдвига.

Одно из конструктивных решений для предотвращения струйного течения – расположить канал сопла и центрального литника не соосно относительно друг друга. В таком случае разбухание струи приведет к контакту со стенкой в стороне смещения канала.

На рисунке 3.16 (а,б) показан процесс течения шликера из сопла машины с расходом 10 см³/с в цилиндрический канал с конусом 5 градусов.

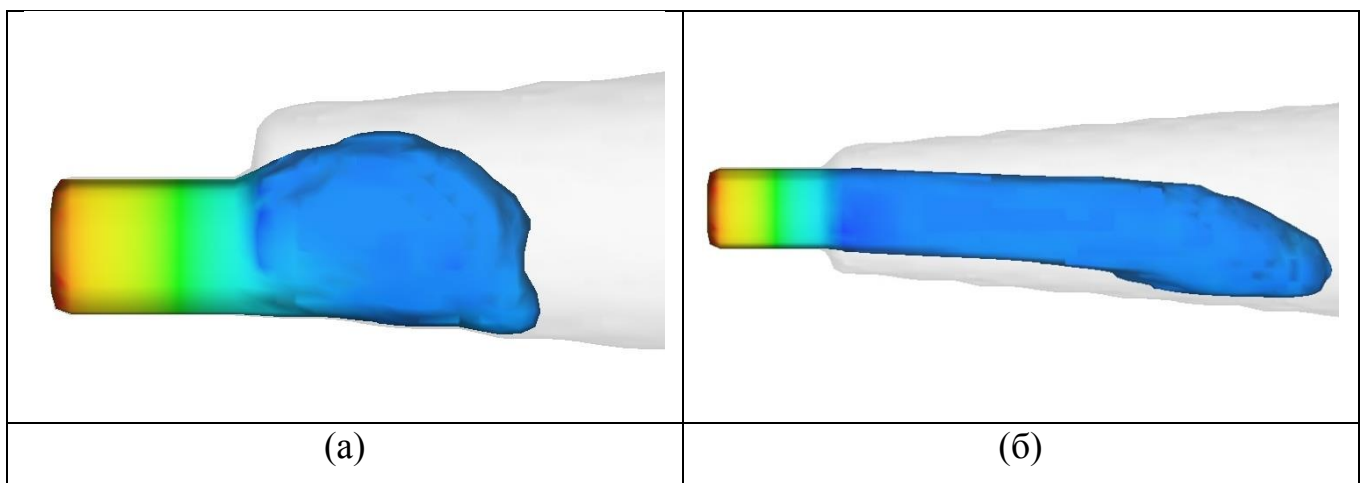


Рисунок 3.16 – (а) несоосные каналы, (б) соосные каналы

В процессе заполнения несоосного канала струйного течения не образовалось. В таком случае можно дать несколько рекомендаций для уменьшения или предотвращения струйного течения шликера:

- уменьшить расход шликера в начальный момент заполнения центрального литника;

- уменьшить конусность центрального литника;
- подводить сопло машины со смещением относительно оси центрального литника;
- делать центральный литник со ступенчатой конусностью, если литник требует большего расширения на входе в разводящие каналы.

3.2.3.2 Распределение вязкости термопластичного шликера в разводящем канале

Расположение разводящих литниковых каналов в форме определяется рядом факторов: количеством гнезд, формой и размерами изделий, конструкцией литейной формы, типом впускного литникового канала. Правильное расположение литниковых каналов, прежде всего, должно обеспечивать минимальные потери давления, а это возможно при уменьшении вязкости шликера или длины канала. Гнезда в формах должны располагаться так, чтобы условия течения расплава шликера от сопла ко всем гнездам были одинаковы. Симметричное расположение гнезд в форме обеспечивает одновременное заполнение расплавом всех гнезд и одинаковые условия подпитки во время выдержки под давлением.

Рассмотрим распределение вязкости в прямом цилиндрическом канале диаметром 2 мм и длиной 25 мм. На рисунке 3.17 представлены результаты расчета распределения вязкости шликера в канале.

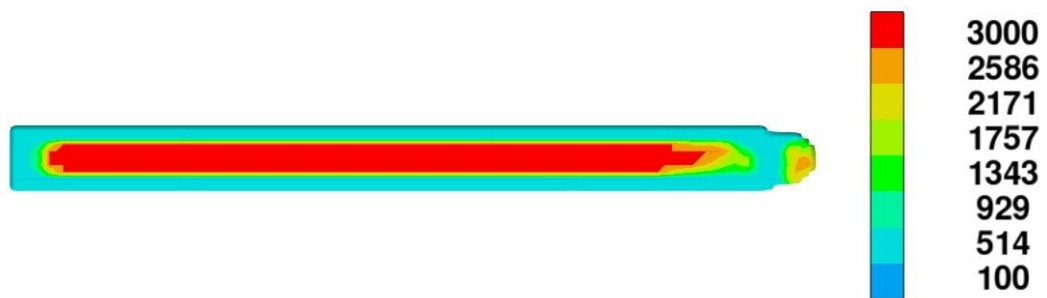


Рисунок 3.17 – Распределение вязкости в прямом цилиндрическом канале диаметром 2 мм

Максимальное значение вязкости шликера сосредоточено в центре канала и уменьшается ближе к стенкам. Для оценки вязкости шликера в канале построим круговую диаграмму и рассмотрим распределения в процентном соотношении по объему. На рисунке 3.18 представлена диаграмма распределения вязкости.



Рисунок 3.18 – Диаграмма распределения вязкости в прямом цилиндрическом канале диаметром 2мм

В канале наибольшее количество шликера с вязкостью 3000 Па*с в центре канала и 514 Па*с ближе к стенкам канала. Снижение вязкости к стенкам канала связано с тиксотропными свойствами шликера. За счет трения шликера о стенки увеличиваются касательные напряжения и снижается вязкость. Построим гистограмму относительного распределения вязкости и наложим на неё общее распределение, рисунок 3.19.

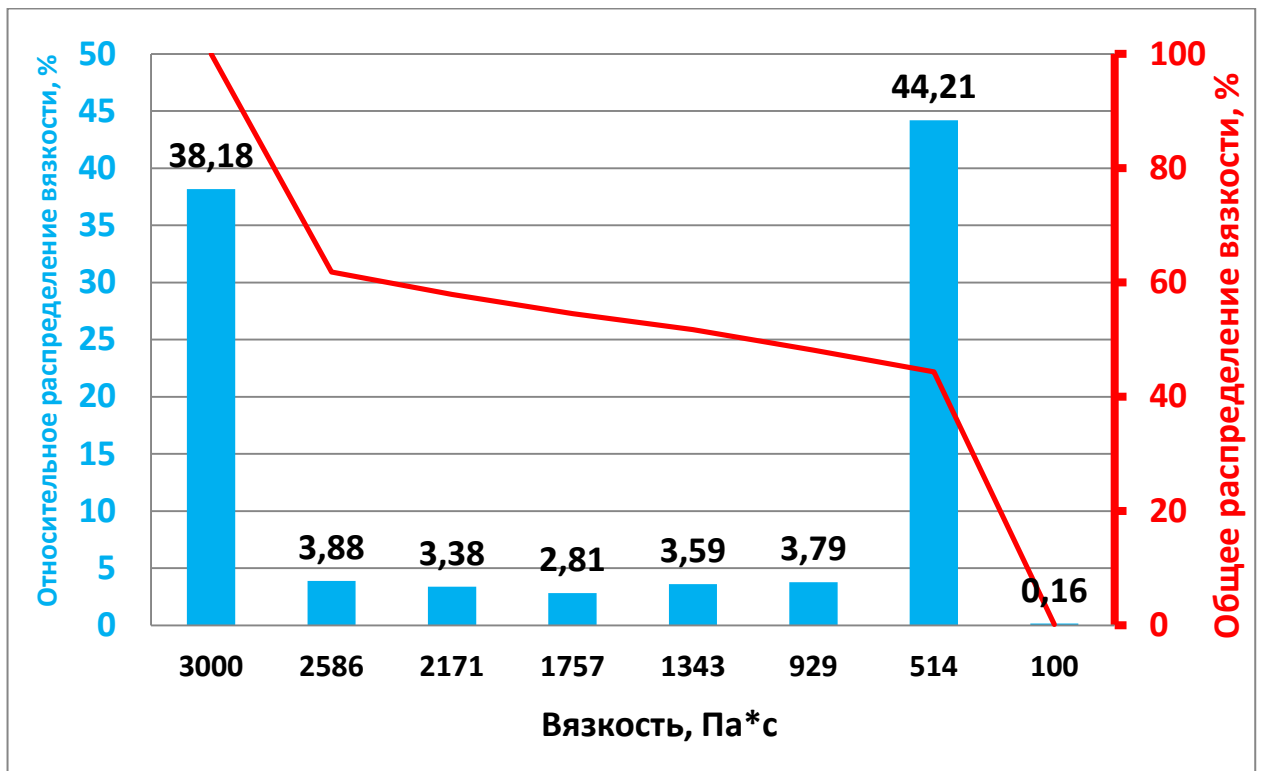


Рисунок 3.19 – Общее и относительное распределение вязкости в прямом цилиндрическом канале

Относительное распределение вязкости шликера показывает нам объем с различной вязкостью от общего объема, а общее распределение вязкости показывает объем шликера с вязкостью до указанного значения. Половина шликера в канале имеет вязкость до 1000 Па*с, а 90% уже до 2800 Па*с.

Для оценки вязкости шликера в канале воспользуемся уравнением Хернинга – Зипперера [97].

$$\mu_{ш} = \frac{\sum_1^n \mu_i \cdot x_i}{\sum_1^n x_i}, \quad (3.5)$$

где n – количество значений вязкости в шликере;

μ_i, x_i – вязкость и молярная доля шликера с данной вязкостью.

Среднее значение вязкости в прямом цилиндрическом канале диаметром 2 мм и длиной 25 мм:

$$\mu_{ш} = \frac{3000 \cdot 0,38 + 2586 \cdot 0,038 + 2171 \cdot 0,033 + 1757 \cdot 0,028 + 1343 \cdot 0,035 + 929 \cdot 0,037 + 514 \cdot 0,44 + 100 \cdot 0,0016}{1} = 1679,44 \text{ Па*с}$$

Среднее значение вязкости в прямом канале оказалась достаточно высокое. Для снижения вязкости шликера в канале добавим перегибы для возмущения ка-

сательных напряжений по всему объёму. Расстояние от входа шликера в канал до выхода сохраним 25 мм. На рисунке 3.20 представлен канал с перегибами в 90°.

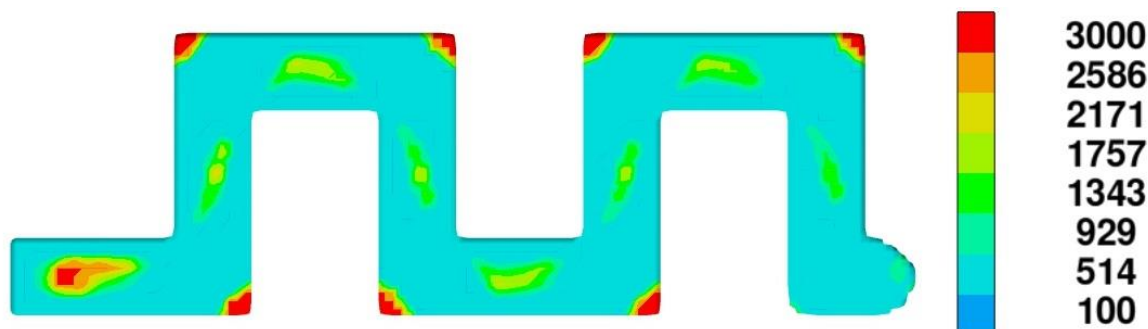


Рисунок 3.20 – Распределение вязкости в цилиндрическом канале диаметром 2мм и перегибами 90°

Видны значительные изменения по сравнению с прямым каналом. Зоны с максимальной вязкостью шликера гораздо меньше и сосредоточены они в углах канала. Для оценки распределения вязкости построим также круговую диаграмму, как для прямого канала, рисунок 3.21.



Рисунок 3.21 – Диаграмма распределения вязкости в цилиндрическом канале диаметром 2мм и перегибами 90°

Максимальное количество шликера в канале 82,2 % имеет вязкость 514 Па*с. Для удобства оценки среднего значения вязкости шликера также построим

гистограммы относительного и общего распределения вязкости шликера в канале с перегибами в 90°, рисунок 3.22.

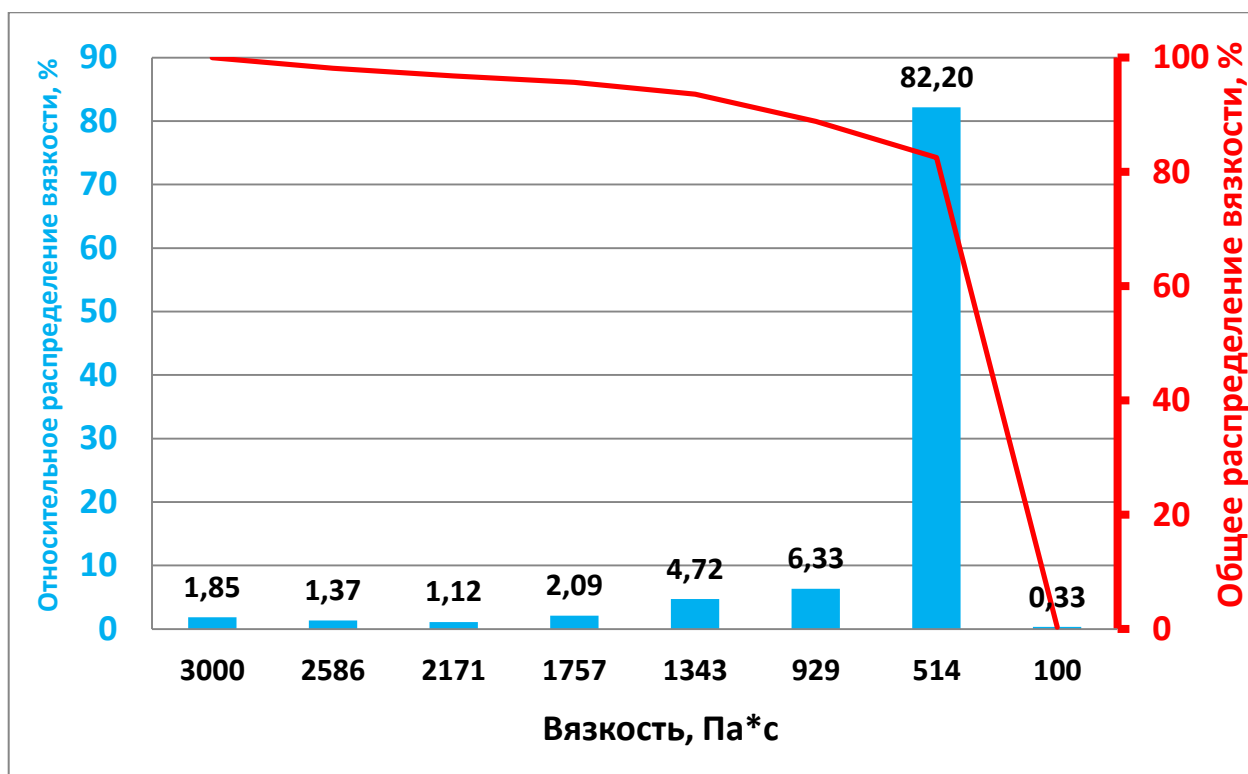


Рисунок 3.22 – Общее и относительное распределение вязкости в прямом цилиндрическом канале

Более 70 % шликера в канале с вязкостью до 514 Па*с, что значительно ниже, чем в прямом. Рассчитаем среднее значение вязкости в канале с перегибами диаметром 2 мм и длиной 25 мм:

$$\mu_{ш} = \frac{3000 \cdot 0,018 + 2586 \cdot 0,013 + 2171 \cdot 0,011 + 1757 \cdot 0,02 + 1343 \cdot 0,047 + 929 \cdot 0,063 + 514 \cdot 0,82 + 100 \cdot 0,003}{1} = 696,82 \text{ Па*с}$$

Согласно средним значениям вязкости шликера видно, что перегибы канала привели к снижению вязкости более чем в 2 раза. На рисунке 3.23 представлены общие распределения вязкости для прямого и с перегибами канала.

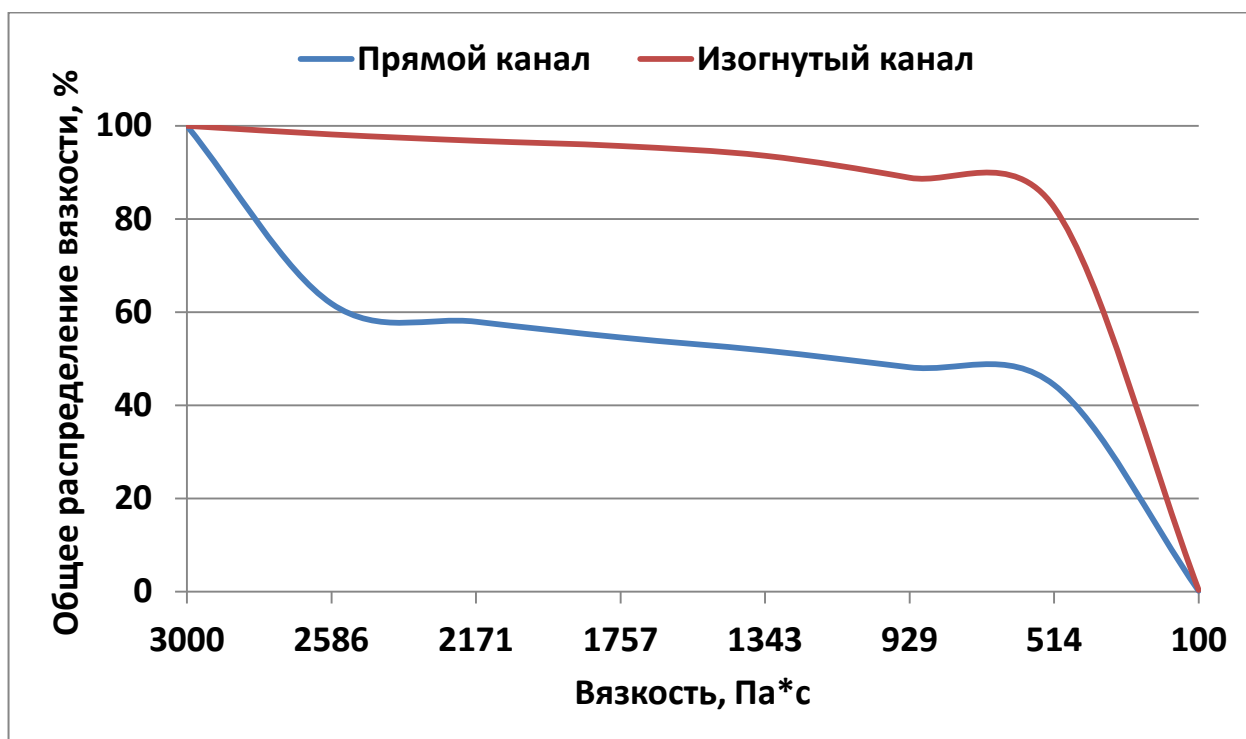


Рисунок 3.23 – Общее распределение вязкости в каналах

До 40% шликера в каналах имеют примерно равную низкую вязкость до 500 Па*с. Если рассматривать 50% и 90% шликера, то в канале с перегибами вязкость значительно ниже почти в 5 раз.

Как уже было сказано в канале с прямыми углами имеются локальные зоны скопления максимальной вязкости шликера, которые расположены непосредственно в самом углу. Для предотвращения подобного эффекта сделаем скругление канала и рассмотрим распределение вязкости в канале, рисунок 3.24.

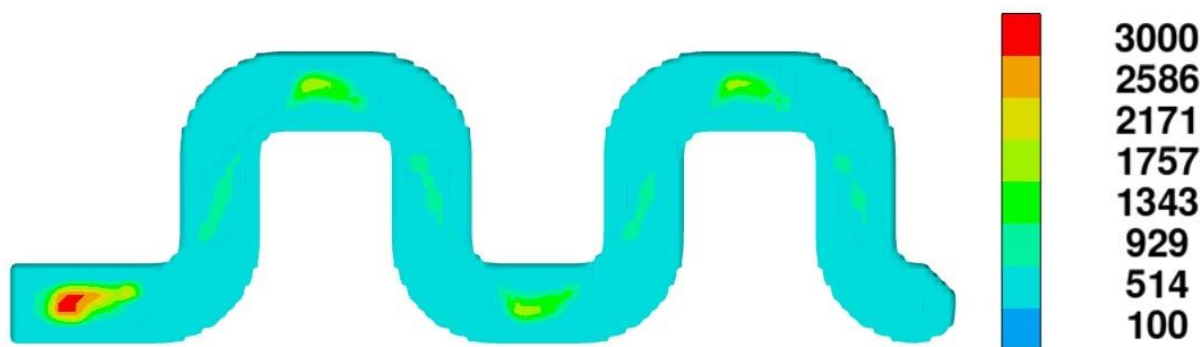


Рисунок 3.24 – Распределение вязкости в цилиндрическом канале диаметром 2 мм и перегибами 90° и скруглёнными углами

Скругление прямых углов канала привело к исключению локальных зон скопления шликера с максимальной вязкостью. Рассчитаем среднюю вязкость в канале со скругленными углами:

$$\mu_{\text{ш}} = \frac{3000 \cdot 0,013 + 2586 \cdot 0,017 + 2171 \cdot 0,017 + 1757 \cdot 0,019 + 1343 \cdot 0,03 + 929 \cdot 0,067 + 514 \cdot 0,82 + 100 \cdot 0,012}{1} = 684,32 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Среднее значение вязкости шликера в канале со скругленными углами особо не изменилось. Соответственно, скруглённые углы каналов привели только к исключению зон, где шликер набирал максимальную вязкость.

Убедившись, что перегибы каналов приводят к снижению вязкости шликера, рассмотрим еще один фактор – это длина прямых участков в подобных каналах. Поскольку шликер восстанавливает вязкость при течении на прямых участках, то стоит их делать, как можно короче. На рисунке 3.25 распределения вязкости в канале с разной длиной прямых участков.

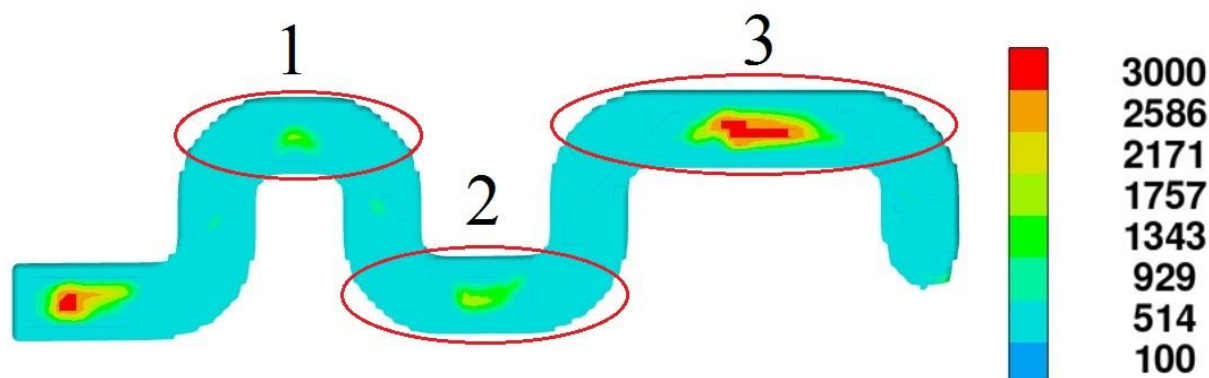


Рисунок 3.25 – Распределение вязкости в цилиндрическом канале диаметром 2мм и перегибами 90 градусов, скруглёнными углами и разной длиной прямых участков

Рассмотрев три прямолинейных участка, которые имеют протяженность $2d$, $2,5d$ и $4d$, соответственно, можно сделать вывод, что чем больше длина прямолинейного участка, тем выше вязкость шликера в канале.

Для выявления зависимости вязкости от угла наклона канала и длины прямого участка проведем полнофакторный эксперимент. Рассмотрим два фактора, влияющие на вязкость шликера в канале – угол наклона канала и длина прямого

участка. Определимся с основным уровнем и интервалом варьирования для каждого фактора, таблица 3.2.

Таблица 3.2 – Характеристики эксперимента

№ опыта	Характеристика	Фактор	
		Угол поворота канала, °	Длина прямого участка, мм
1	Основной уровень	30	4
2	Интервал варьирования	15	2
3	Нижний уровень	15	2
4	Верхний уровень	45	6

Произведем преобразование факторов из натурального масштаба в безразмерный по формуле (3.6).

$$X_i = \frac{x_i - x_{0i}}{\Delta x_i}, \quad (3.6)$$

где x_i – значение фактора на верхнем и нижнем уровнях,

x_{0i} – основной уровень фактора,

Δx_i – интервал варьирования фактора.

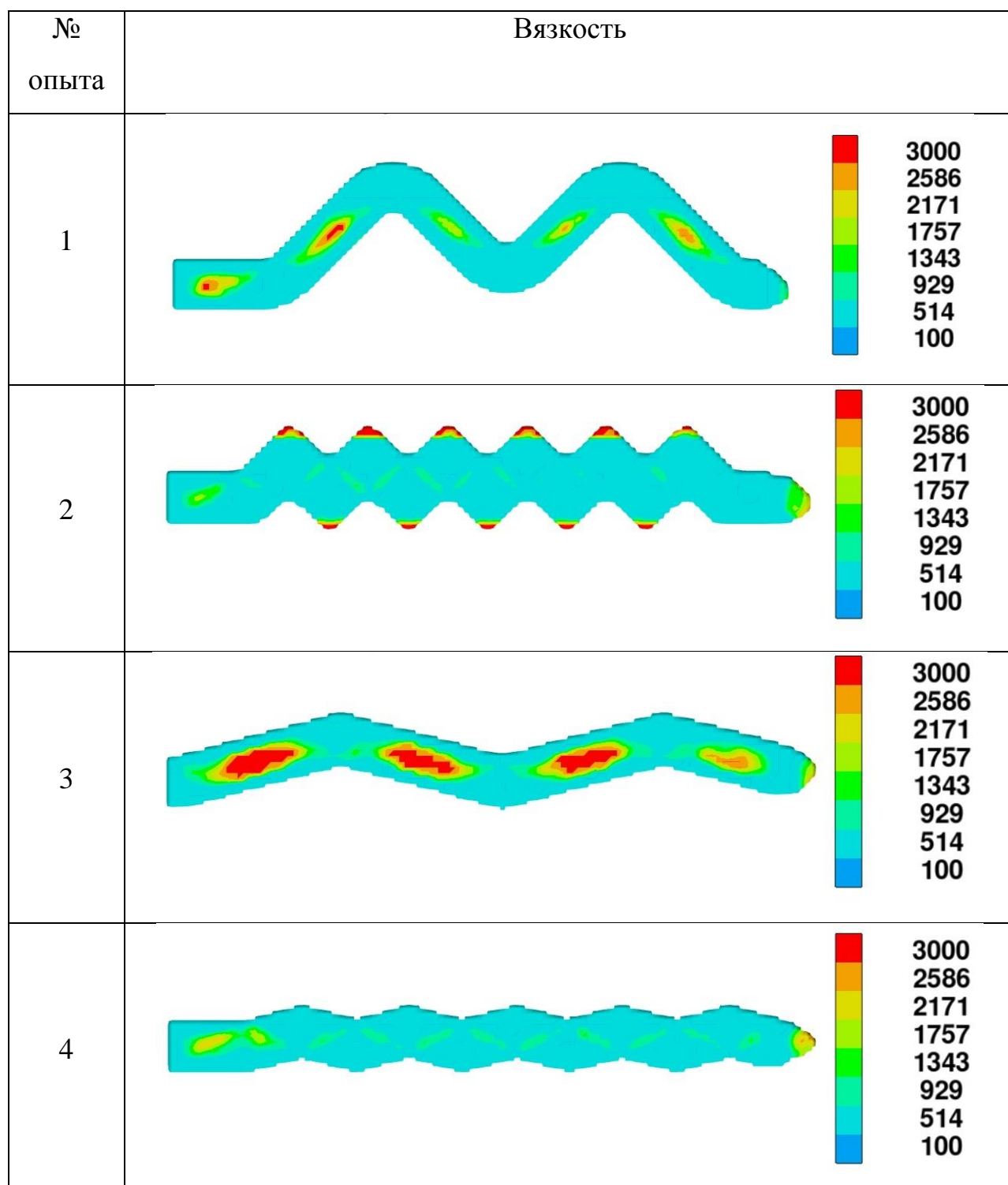
В экспериментах факторы будут принимать значения только на верхнем и нижнем уровне, поэтому кодированные переменные X_i будут принимать значения +1 и -1. Составим матрицу планирования эксперимента, таблица 3.3.

Таблица 3.3 – Матрица планирования эксперимента

№ опыта	Фактор		
	X_0	X_1	X_2
1	+	+	+
2	+	+	-
3	+	-	+
4	+	-	-

Определим вязкости в канале для каждого эксперимента. Результаты моделирования каналов представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты моделирования разводящих каналов



Определим средние значения вязкости в каждом опыте.

Опыт 1:

$$\mu_1 = \frac{3000 \cdot 0,02 + 2586 \cdot 0,032 + 2171 \cdot 0,036 + 1757 \cdot 0,033 + 1343 \cdot 0,049 + 929 \cdot 0,086 + 514 \cdot 0,72 + 100 \cdot 0,015}{1} = 803,35 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Опыт 2:

$$\mu_2 = \frac{3000 \cdot 0,029 + 2586 \cdot 0,027 + 2171 \cdot 0,026 + 1757 \cdot 0,025 + 1343 \cdot 0,032 + 929 \cdot 0,059 + 514 \cdot 0,78 + 100 \cdot 0,014}{1} = 765,89 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Опыт 3:

$$\mu_3 = \frac{3000 \cdot 0,087 + 2586 \cdot 0,077 + 2171 \cdot 0,063 + 1757 \cdot 0,05 + 1343 \cdot 0,056 + 929 \cdot 0,1 + 514 \cdot 0,53 + 100 \cdot 0,017}{1} = 1143,91 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Опыт 4:

$$\mu_4 = \frac{3000 \cdot 0,022 + 2586 \cdot 0,032 + 2171 \cdot 0,031 + 1757 \cdot 0,03 + 1343 \cdot 0,03 + 929 \cdot 0,08 + 514 \cdot 0,77 + 100 \cdot 0,019}{1} = 783,41 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Составим уравнение регрессии типа:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2, \quad (3.7)$$

где $X_1 = \frac{\varphi - 30}{15}$

$$X_2 = \frac{L - 4}{2}$$

φ – угол наклона канала, град

L – длина канала, мм

Рассчитаем коэффициенты уравнения регрессии:

$$b_0 = \frac{1}{4} \cdot (803,35 + 765,89 + 1143,91 + 783,41) = 874,14 \quad (3.8)$$

$$b_1 = \frac{1}{4} \cdot (803,35 + 765,89 - 1143,91 - 783,41) = -89,52 \quad (3.9)$$

$$b_2 = \frac{1}{4} \cdot (803,35 - 765,89 + 1143,91 - 783,41) = 99,49 \quad (3.10)$$

Уравнение регрессии с рассчитанными коэффициентами:

$$Y = 874,14 - 89,52 \cdot \frac{\varphi - 30}{15} + 99,49 \cdot \frac{L - 4}{2} \quad (3.11)$$

Согласно полученной зависимости вязкость уменьшается при уменьшении прямых участков и увеличении угла перегиба.

3.2.4 Выбор места расположения впускного литника

Через впускной литник шликер поступает в полость формы. Впускной литник это самое узкое сечение литниковой системы, чтобы легко отделяться от из-

деляя, не оставляя на нем заметных следов. Помимо этого сужение канала увеличивает скорость впрыска шликера в полость, повышает температуру и снижает вязкость. Но чрезмерное уменьшение сечения впускных каналов увеличивает сопротивление при заполнении и ухудшает условия заполнения формы, сильный дополнительный разогрев шликера может привести к его деструкции.

Выбор места впуска связан с необходимостью обеспечения полного заполнения полости формы и предотвращения струйного течения шликера. Наиболее эффективным расположением впускного литника является по оси разводящего канала, это обеспечивает перетекание шликера в полость формы до полного затвердевания впускного литника.

При выборе места подвода шликера в полость пресс-формы следует проанализировать конфигурацию отливки с точки зрения направления потока в процессе заполнения. Очевидно, что при одинаковой толщине стенки отливки по направлению заполнения полости формы будет обеспечиваться заполнение фронтом. Участки, где имеются сужения сечения отливки, нарушают плавность заполнения формы из-за возрастания скорости потока. За такими сужениями находятся зоны отливки, в которых будет образовываться струйное течение шликера. Если не обеспечивать режимы заполнения в этой стадии заполнения или дополнительные подводы шликера в эти зоны, то в них образуются газовые поры из-за захвата воздуха.

Для анализа течения шликера в отливке можно применить по аналогии метод вписанных окружностей или шаров. Сущность метода сводится к следующему. В наиболее массивные части отливки вписывают окружность. Если их можно беспрепятственно выкатить через стенки отливки к месту подвода шликера, то плавное заполнение полости отливки будет обеспечено. Применение этого метода наглядно иллюстрирует на рисунке 3.26. В отличие от окружности, вписанной в участок 2, окружность, вписанную в участок 1 (рисунок 3.26, а), нельзя выкатить к месту подвода. Поэтому, если не принять необходимых мер, в данном участке отливки образуются дефекты. Для предотвращения дефекта на данном участке можно, например, снизить скорость заполнения на входе шликера в этот участок.

На рисунке (3.26, в) показана отливка, удовлетворяющая принципу заполнения без образования струйного течения, так как окружности, вписанные во все элементы отливки, можно беспрепятственно выкатить к месту подвода шликера.

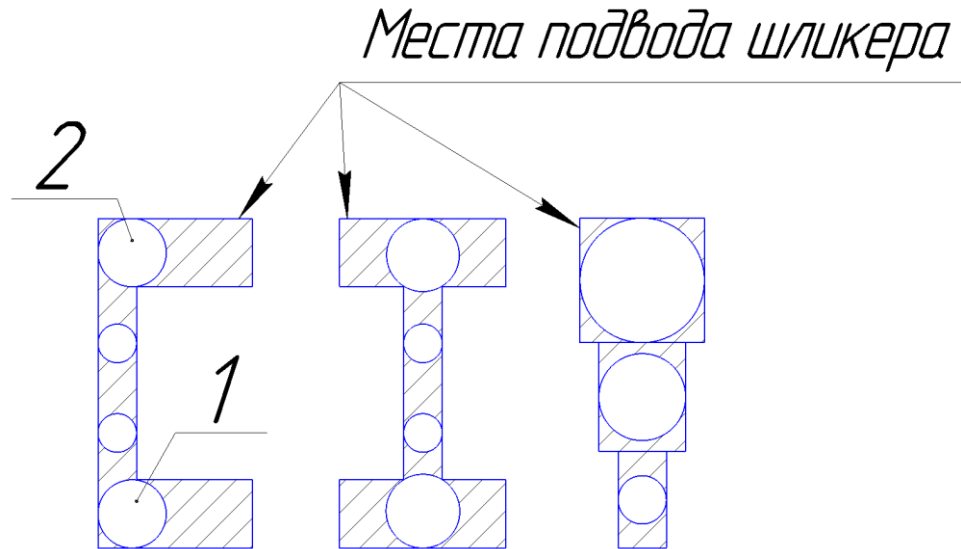


Рисунок 3.26 – Применение метода вписанных окружностей:

а-в – типы конструкций отливок

На рисунке (3.27, а) представлена отливка в виде равностороннего треугольника толщиной 2 мм. Проанализировав данную отливку можно сказать, что она имеет один массивный узел в центре и маленькие узлы в углах треугольника. Рассмотрим вариант подвода в массивную часть отливки, результаты заполнения представлены на рисунке (3.27, б).

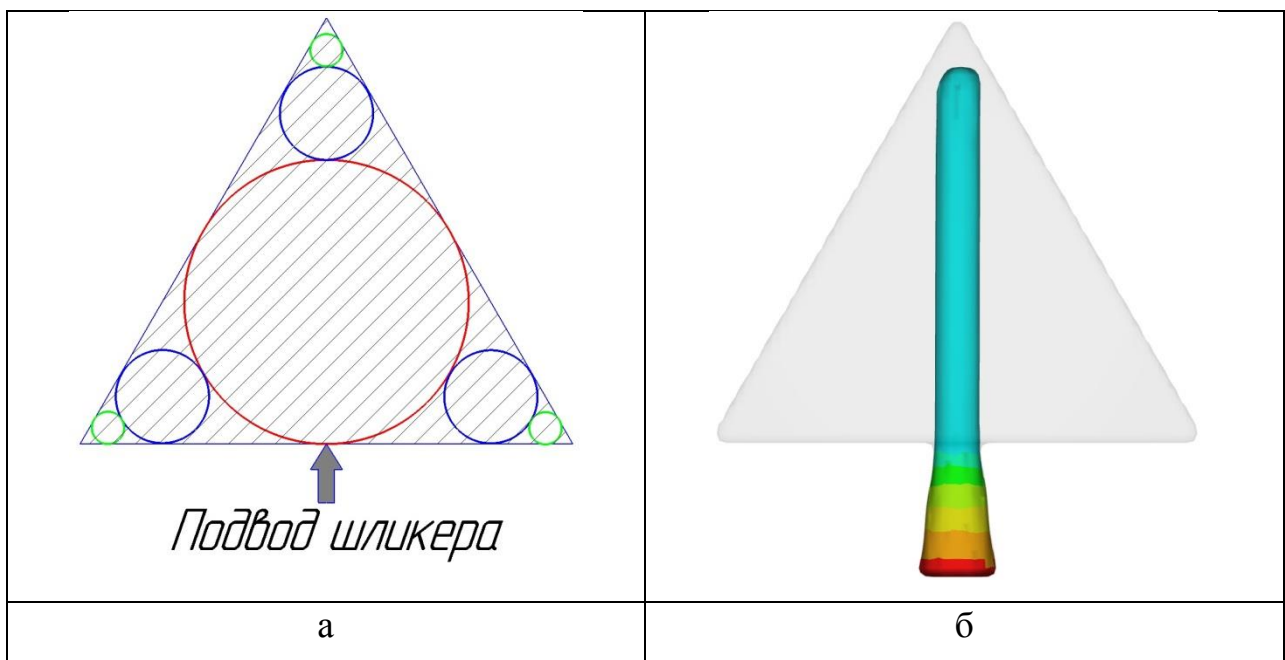


Рисунок 3.27 – Отливка «Треугольник» подвод в массивную часть

При выходе шликера из впускного литника в массивную часть отливки образовалось струйное течение. Для предотвращения струйного течения подведем шликер в угол треугольника, рисунок (3.28, а). Результаты заполнения показаны на рисунке (3.28, б).

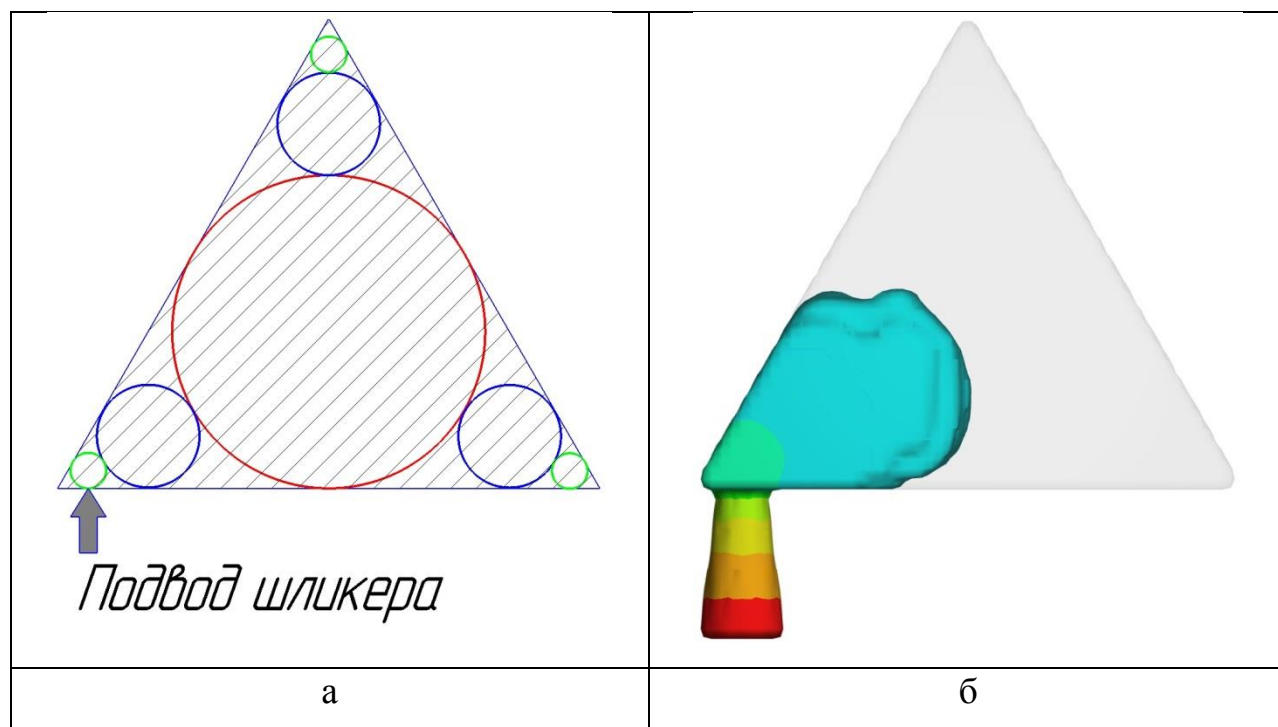


Рисунок 3.28 – Отливка «Треугольник» подвод в угол

Из расчета видно, что шликер заполняет полость отливки фронтом без образования струйного течения.

В отливке «Корпус», рисунок 3.29, два массивных узла 1 и 2.

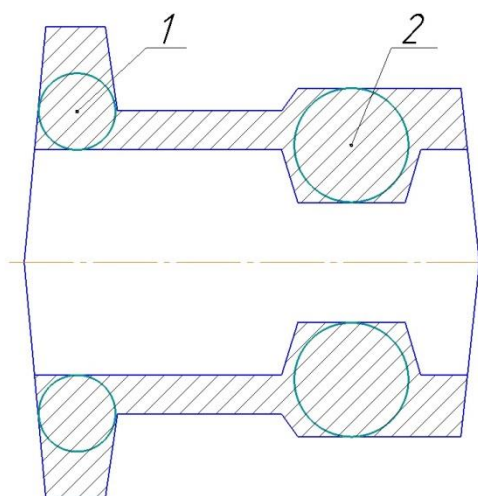


Рисунок 3.29 – Анализ конструкции отливки «Корпус»

Рассмотрим места подвода шликера в отливку. При подводе шликера в массивный узел 1 рисунок (3.30,а), во втором возникает струйное течение шликера, а если подводить шликер со стороны массивного узла 2 рисунок (3.30,б), то в первом узле струйного течения не возникает.

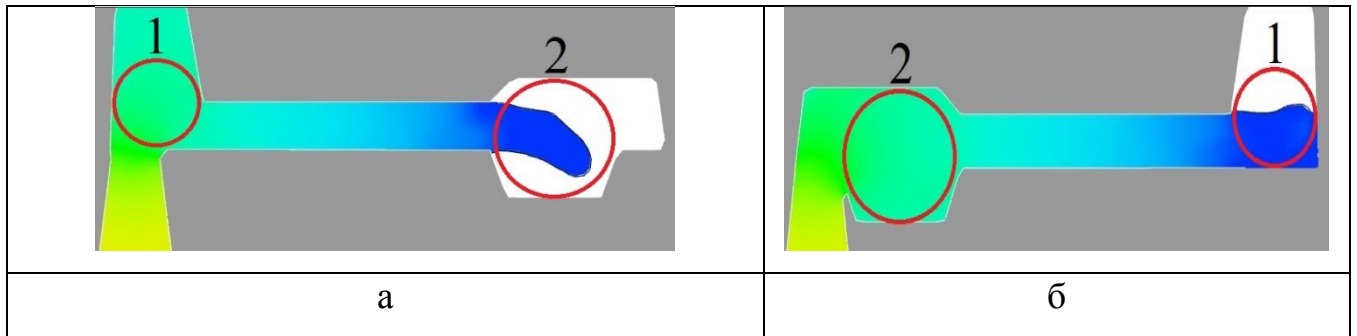


Рисунок 3.30 – Подвод шликера в массивный узел 1 (а) и 2 (б)

Это связано с тем, что в первом варианте подвода при выходе шликера в массивный узел 2 теряется полный контакт шликера со стенками формы, а во втором случае контакт непрерывный, что мешает образованию струйного течения.

Рассмотрим место подвода шликера на отливке «Колесо». В отливке «Колесо» можно выделить два изолированных массивных узла, рисунок 3.31.

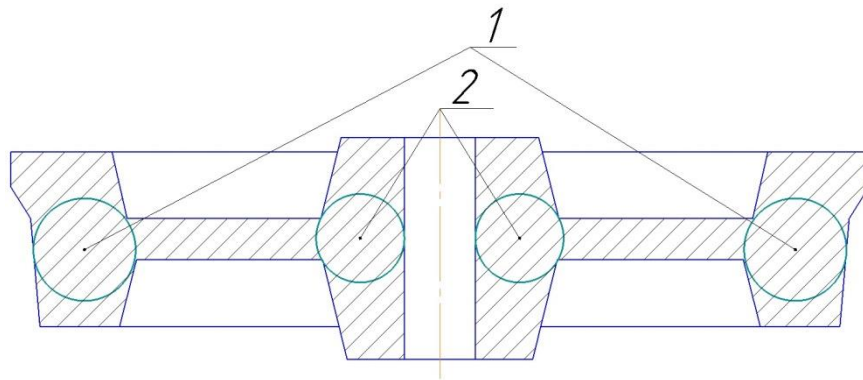


Рисунок 3.31 – Анализ конструкции отливки «Колесо»

Действительно, окружность, вписанную в узел 1, нельзя выкатить через тонкие спицы колеса в узел 2 к месту подвода шликера, расположенного под узлом 2, рисунок (3.32, а). Аналогично в узел 1 нельзя выкатить окружность, вписанную в узел 2, если осуществлять подвод шликера в узле 1, рисунок (3.32, б). Вследствие чего в массивных узлах образуется струйное течение.

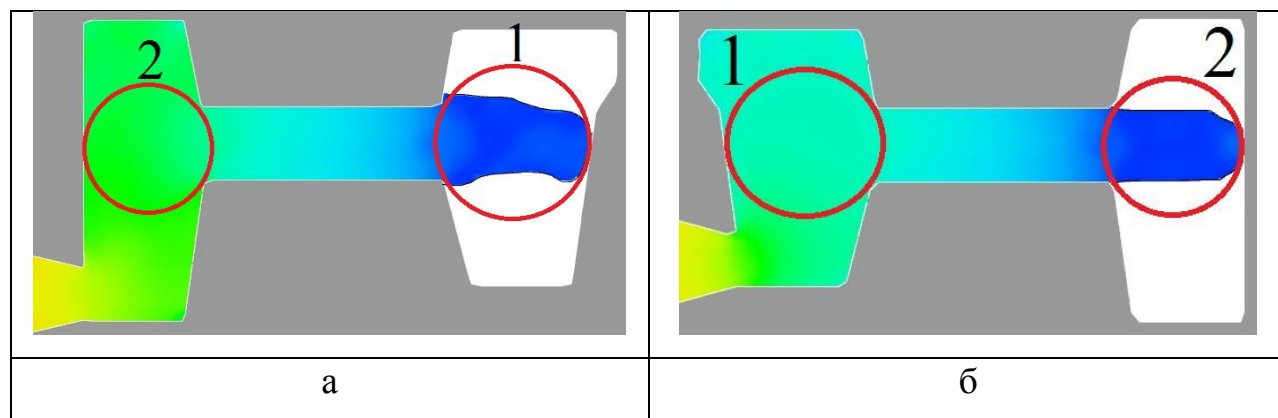


Рисунок 3.32 – Анализ места подвода шликера в отливке «Колесо»

Если не удастся устранить струйное течение за счет выбора места подвода шликера, то для обеспечения равномерного заполнения необходимо регулировать скорость подачи шликера на входе в массивный узел. На рисунке 3.33, показано заполнение массивного узла 1 со сниженной скоростью подачи шликера.

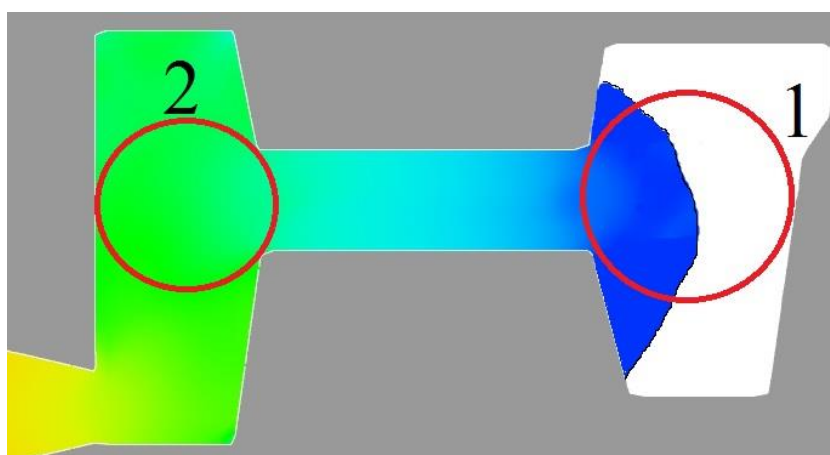


Рисунок 3.33 – Снижение скорости шликера в момент заполнения массивного узла 1

При выборе места подвода шликера в полость пресс-формы следует обратить внимание на расширяющиеся места в отливке, в которых может 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. Снижать скорость в начале заполнения массивного узла отливки.

3.3 Рекомендации расчета элементов литниковой системы

Как уже было сказано выше, литниковая система состоит из трех основных элементов центрального литника, разводящих каналов и питателя. Размеры проходных каналов элементов литниковой системы определяют, во-первых, продолжительность охлаждения шликера в этих элементах и, следовательно, продолжительность подпитки – поступления новых порций расплава в форму после окончания ее заполнения, т. е. время выдержки шликера в форме под давлением, и, во-вторых, потери давления, возникающие в этих элементах, и давление, передаваемое в форму [109-112]. В связи с этим размеры проходных каналов элементов литниковой системы рассчитывают с учетом термодинамических и гидродинамических факторов процесса литья.

В одногнездных формах применяют простую литниковую систему, которая, как правило, состоит только из центрального литника. В многогнездных формах применяют разветвленную литниковую систему, которая включает центральный литник, систему разводящих каналов для подвода шликера к гнездам формы и систему впускных литниковых каналов.

На рисунке 3.34 представлена блок-схема проектирования литниковой системы для литья шликера под давлением.

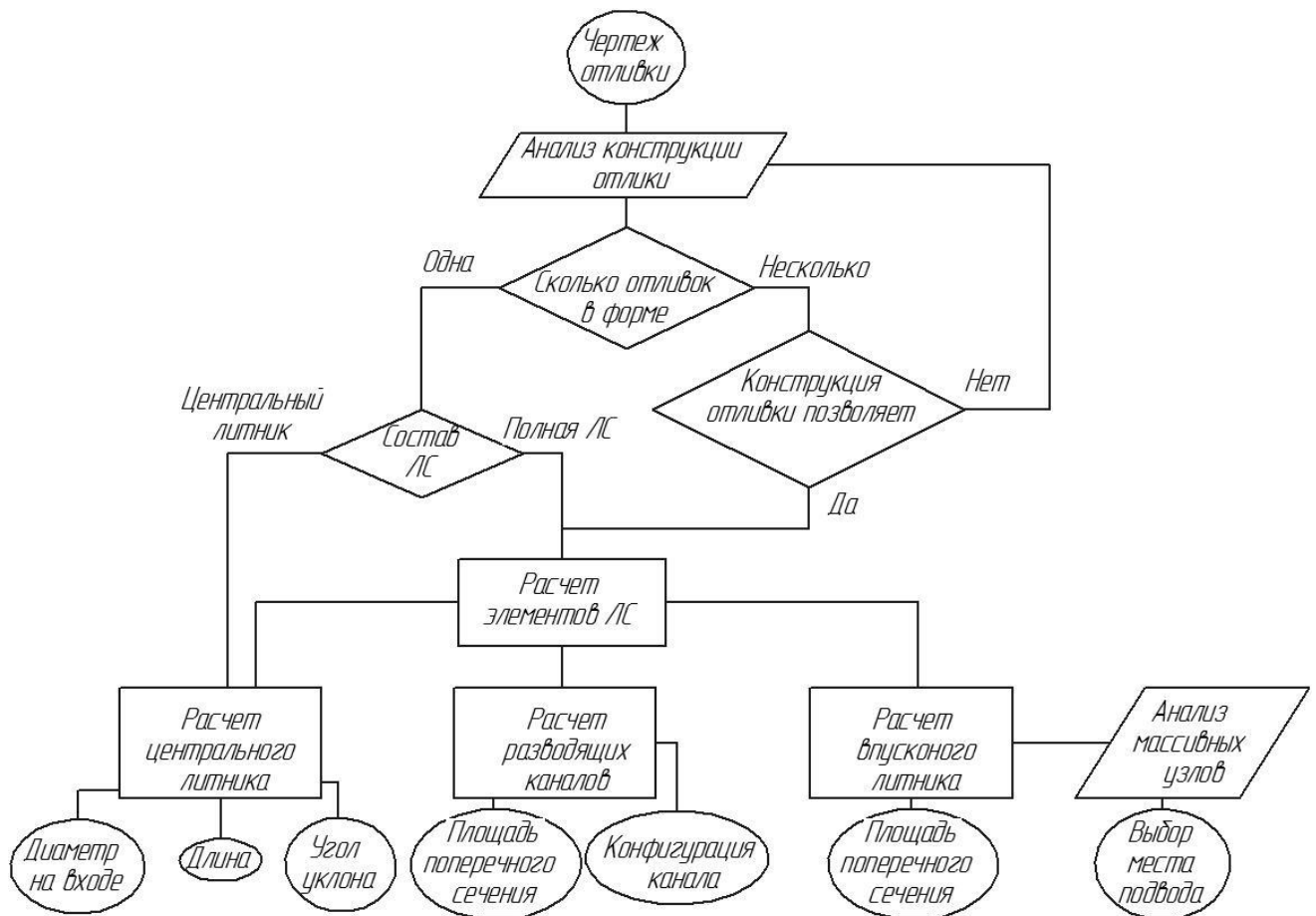


Рисунок 3.34 – Блок-схема проектирования ЛС

Основные параметры центрального литника, который представляет собой конический канал, это диаметр на входе и угол уклона. Основной задачей при проектировании центрального литника является предотвращение струйного течения шликера при его выходе из сопла машины литья под давлением. Способы предотвращения показаны в разделе 3.2.3.

Разводящие каналы литниковой системы, помимо доставки шликера до гнезд отливок, могут снижать вязкость шликера, увеличивая скорости сдвига за счет криволинейной формы канала.

Впускной литник это последний элемент литниковой системы перед полостью отливки. Из-за сужения канала, которое необходимо для беспрепятственного отделения литника от отливки, происходит разогрев шликера и снижение его вязкости.

Важным этапом проектирования литниковой системы является место подвода литника в отливку. Так как из более узкого сечения шликер попадает в более

широкое, то возникает струйное течение подобно центральному литнику. Поэтому при выборе места подвода шликера следует выбирать места, в которых струйное течение будет погашено. Если конструкция отливки не позволяет это обеспечить, то следует снизить скорость подачи шликера.

Выводы по третьей главе

1. Увеличение длины литниковых каналов увеличивает давление прессования шликера;
2. Снижение вязкости шликера уменьшает давление прессования;
3. Изменение геометрии литниковых каналов приводит к увеличению сдвиговых скоростей в расплаве и снижению вязкости шликера;
4. Для предотвращения струйного течения шликера стоит уменьшать скорость заполнения массивных узлов или «держат» шликер в постоянном контакте с формой в процессе заполнения.

4. РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ И МЕТОДИКИ ПОЛУЧЕНИЯ ДЕТАЛИ «Шептало»

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. К детали предъявляются высокие механические требования согласно методам испытания по ГОСТ 1497-84. Технические требования для изделия представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Технические требования к детали «Шептало»

Характеристики	Значения
Плотность	7,5-7,7 г/см ³
Предел текучести	360 МПа
Предел прочности	650 МПа
Относительное удлинение	3-8 %
Твердость	130 - 230 HV
Шероховатость поверхности	Ra ≥ 1,6 мкм
Объемная плотность	98-99 %
Внешний вид	отсутствие трещин, раковин и расслоений

На рисунке 4.1 представлен чертеж детали.

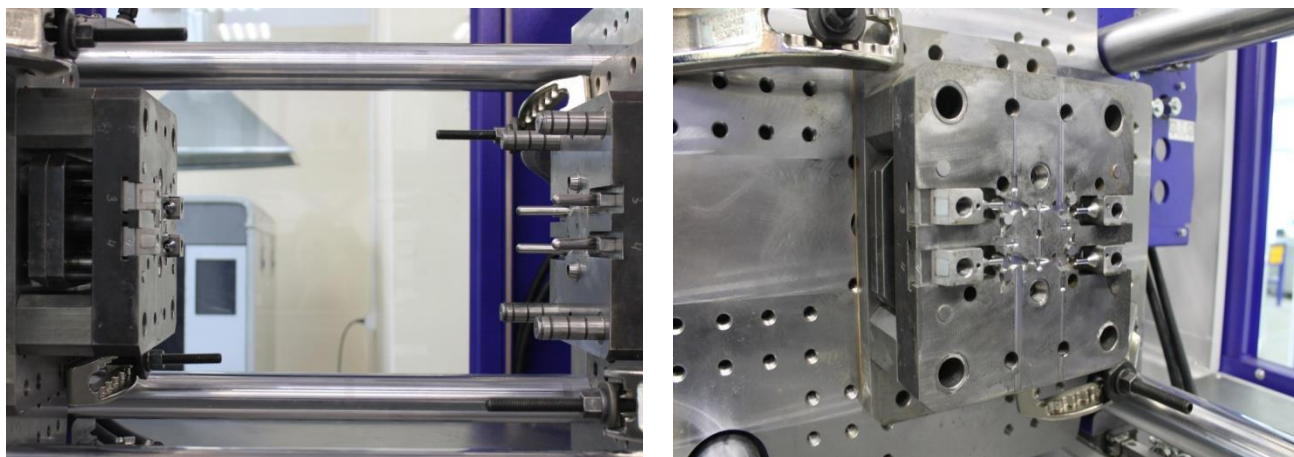


Рисунок 4.2 – Пресс-форма на машине

Исследование режимов литья и обработка пресс-формы осуществлялись на термопластавтомате witman battenfeeld/smart power 50. Технические характеристики машины литья под давлением представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Технические характеристики ТПА

Диаметр шнека	мм	14
Ход шнека	мм	90
Рабочий объем	См ³	13,9
Максимальное давление прес-сования	бар	3000
Максимальное усилие заперения	кН	500
Мин. габариты пресс-формы	мм x мм	226 x 226
Макс. вес пресс-формы	кг	700
Рабочая температура	°С	до 350

4.1 Применение разработанной методики расчета литниковой системы для отливки «Шептало»

Рассмотрев конфигурацию отливки «Шептало», рисунок 4.3, можно выделить три массивные зоны изолированные друг от друга узкими каналами.

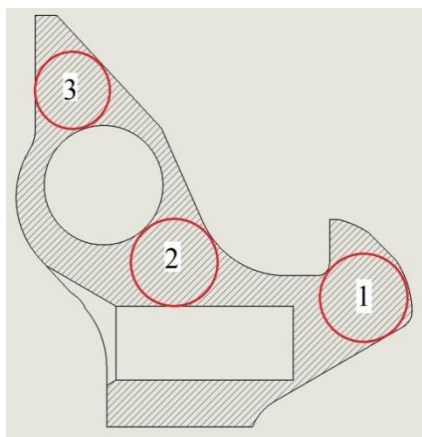


Рисунок 4.3 – Анализ отливки «Шептало»

Выделенные массивные узлы отливки являются уязвимыми зонами для возникновения дефектов. Это связано с возникновением струйного течения шликера в данных зонах, которое приводит к захвату воздуха в расплав. Вследствие чего в изделии появляются дефекты в виде пористости, рыхлоты, неслитин и трещин.

Для устранения дефектов в изделии можно следовать в нескольких направлениях. Проектирование новой оснастки для литья под давлением с использованием разработанной методики расчета литниковых систем. А второй путь – при уже существующей оснастке, подбор оптимальных режимов литья под давлением шликера, опираясь на конструктивные особенности отливки.

4.1.1 Определение состава литниковой системы и количества гнезд в пресс-форме

Состав элементов литниковой системы для отливки «Шептало» определяется конфигурацией. Деталь имеет одно сквозное отверстие диаметром 6,04 мм и одно глухое отверстие диаметром 4 мм, центральные оси которых перпендикулярны друг другу. В связи с данной особенностью наиболее рационально разработать четырех гнездную пресс-форму со стержнями, формирующими глухие отверстия детали. Поскольку в форме четыре гнезда, то одним из главных условий её заполнения – это обеспечить равномерное заполнение всех формообразующих

полостей с одинаковым давлением. Поэтому при компоновке элементов литниковой системы желательно соблюдать симметрию относительно центрального литника.

Литниковая система для изделия «Шептало» будет состоять из одного центрального литника, двух разводящих каналов и четырех впускных литников, рисунок 4.4.

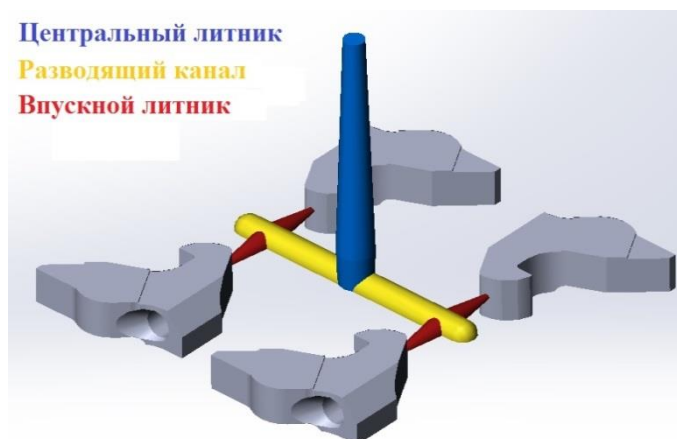


Рисунок 4.4 – Состав литниковой системы «Шептало»

На рисунке 4.4 место подвода шликера и расположение отливок выбрано условно.

4.1.2 Выбор места подвода термопластичного шликера

На первом этапе расчета литниковой системы определимся с местом подвода шликера. Наиболее предпочтительно направлять поток шликера от массивного узла к более узкому в полости отливки, обеспечивая равномерный фронт заполнения, согласно методу «вписанных сфер», который описан в третьей главе диссертации.

Рассмотрим возможные места подвода шликера в полость пресс-формы изделия «Шептало». Наиболее подходящими являются массивные узлы 1 и 3, рисунок 4.3, так как поток шликера будет заполнять полость единым фронтом.

Рассчитаем все возможные варианты подвода шликера. В процессе моделирования заполнения формы при разных местах подвода начальные условия были одинаковыми. Основные параметры моделирования представлены в таблице 4.3

Таблица 4.3 – Основные параметры моделирования

Параметр	Значение
Температура шликера	463 К
Температура формы	403 К
Расход шликера постоянный	10 см ³ /с

Рассмотрим массивный узел 1. На рисунке 4.5 представлены результаты расчета заполнения узла.

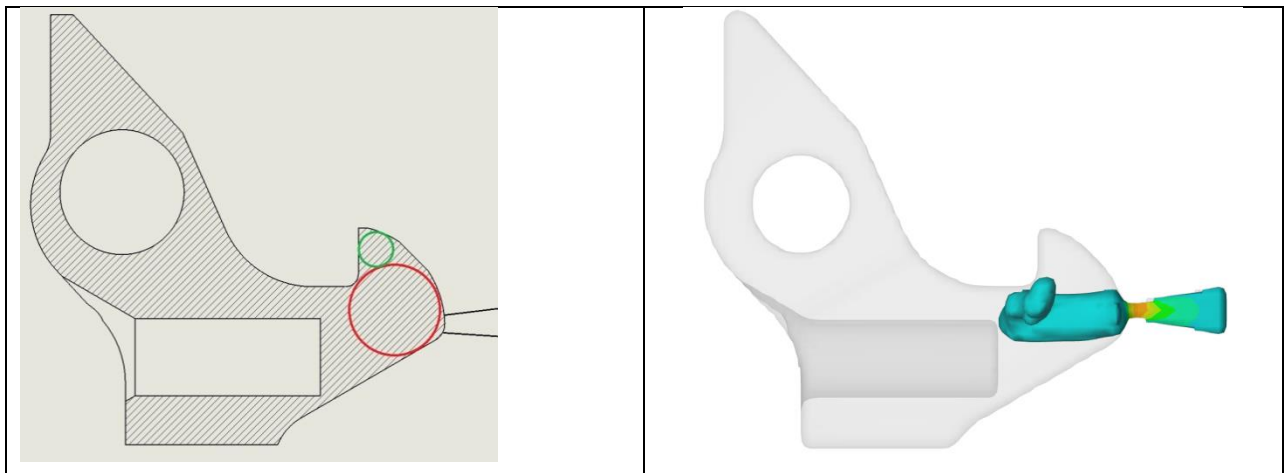


Рисунок 4.5 – Подвод шликера к массивной части узла 1

При данном варианте подвода шликера видно, что на участке массивного узла формируется струйное течение шликера, область красной вписанной сферы. Тогда было предложено сместить область подвода в более замкнутое пространство массивного узла 1, но результат расчета заполнения на рисунке 4.6 показал практически аналогичный результат.

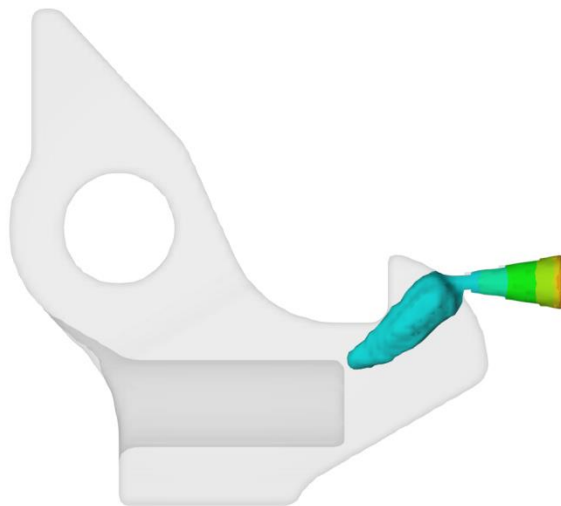


Рисунок 4.6 – Подвод шликера к массивной части узла 1

Такое поведение шликера связано с криволинейной формой массивного узла в месте подвода. Струя шликера стремится к центру массивного узла в радиальном направлении кривой описывающий узел.

Второе наиболее подходящее место подвода – массивный узел 3. Результат расчета заполнения данного узла представлено на рисунке 4.7.



Рисунок 4.7 – Подвод шликера к массивной части узла 3

Выбранное место подвода обеспечивает равномерный фронт заполнения без образования струйного течения.

Массивный узел 2 конструктивно расположен таким образом, что к нему подвод шликера затруднителен. А варианты с двойным подводом шликера не рассматриваются, согласно разработанным рекомендациям, поскольку объем отливки составляет $1,78 \text{ см}^3$, а максимальный габаритный размер 31 мм.

4.1.3 Рекомендации для центрального литника

В центральном литнике необходимо создать фронт потока шликера при выходе его из сопла машины литья под давлением. Это достижимо двумя способами – занижение скорости впуска на входе в центральный литник или согласно разработанным рекомендациям, сместить ось сопла машины литья под давлением относительно оси литниковой втулки пресс-формы. На рисунке 4.8 схематично представлено расположение сопла относительно литниковой втулки.

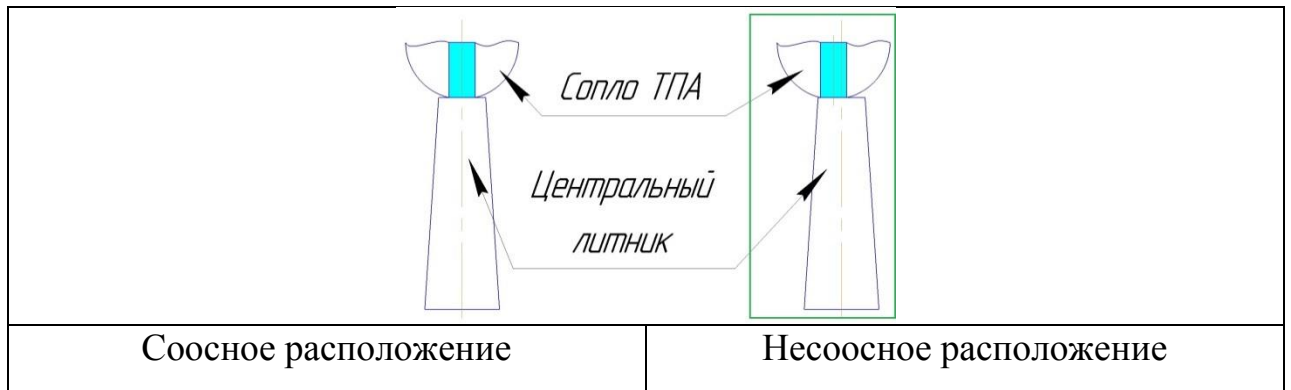


Рисунок 4.8 – Расположение сопла относительно центрального стояка

Параметры центрального литника выберем согласно рекомендациям разработанных в третьей главе, которые указывают, что при расходе шликера до $2,5 \text{ см}^3/\text{с}$ конусность центрального литника до 2° . При расчете параметров центрального литника учитывались конструктивные особенности литниковой втулки, рисунок 4.9. Согласно стандартным размерам по ГОСТ 22077-76 длина литниковой втулки 45 мм, тогда уклон центрального литника составит 2 градуса.

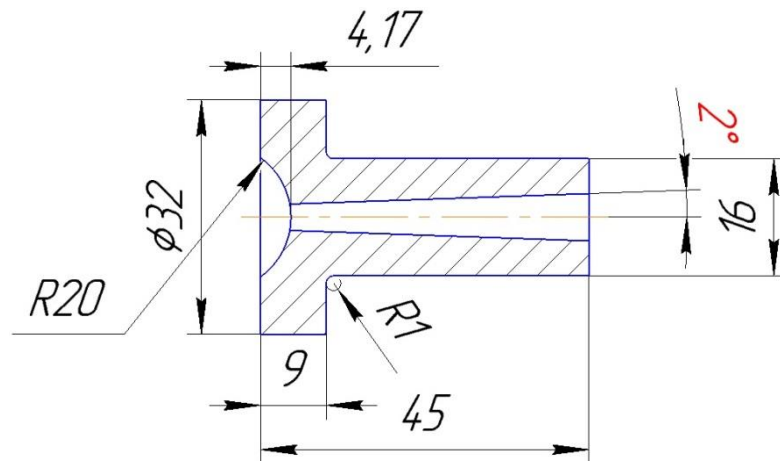


Рисунок 4.9 – Литниковая втулка

Результаты расчета заполнения центрального литника шликером представлены на рисунке 4.10., где реализована схема несоосного расположения литниковой втулки и сопла машины литья под давлением.

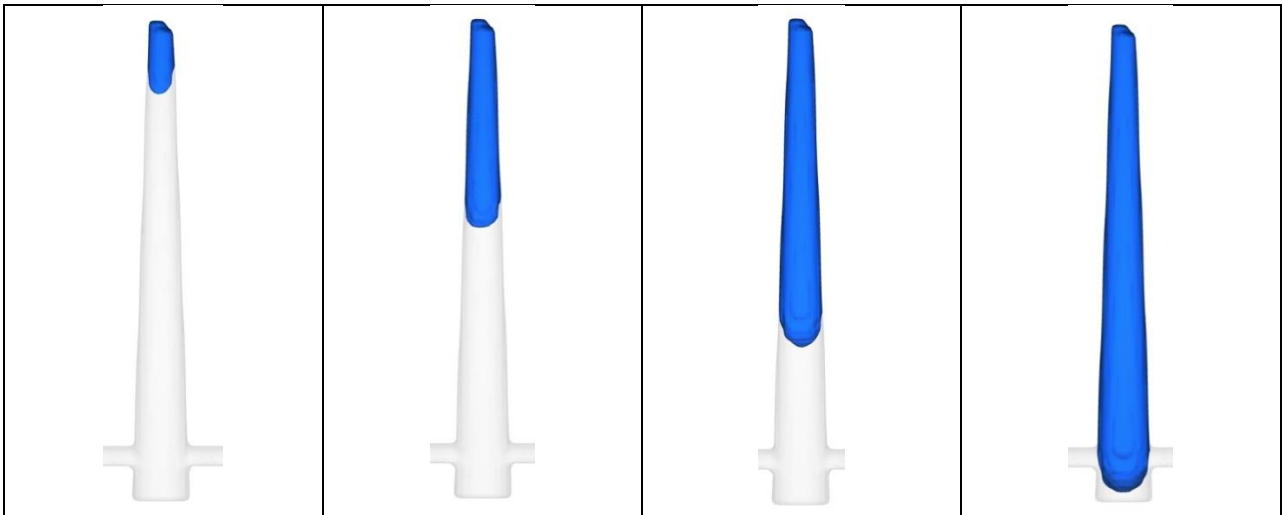


Рисунок 4.10 – Расчет заполнения центрального литника

Равномерный фронт потока формируется уже в начале заполнения центрального литника и сохраняется до поступления шликера в разводящие каналы. Общая длина литника с учетом зумпфа для сбора первых порций расплава 60 мм.

4.1.4 Рекомендации для разводящих каналов

После заполнения центрального литника шликер попадает в разводящие каналы, которые выполняют функцию доставки шликера от центрального литника к впускным литникам.

Рабочая температура пресс-формы 393-403 К, что ниже температуры расплава на 60-70 К. В процессе заполнения литниковой системы, шликер теряет температуру особенно в местах прямого контакта с металлической формой в так называемом пристеночном слое. Снижение температуры шликера приводит к повышению его вязкости, что приводит к затруднению заполнения полости формы.

В силу своих тиксотропных особенностей значение вязкости шликера можно нормализовать в разводящем канале при увеличении касательных напряжений за счет его геометрии. На рисунке 4.11 представлена геометрия разводящего канала, построенная по разработанным рекомендациям.

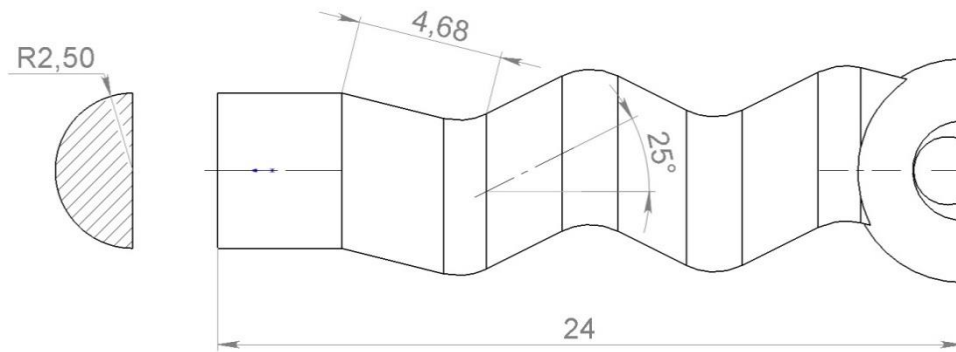
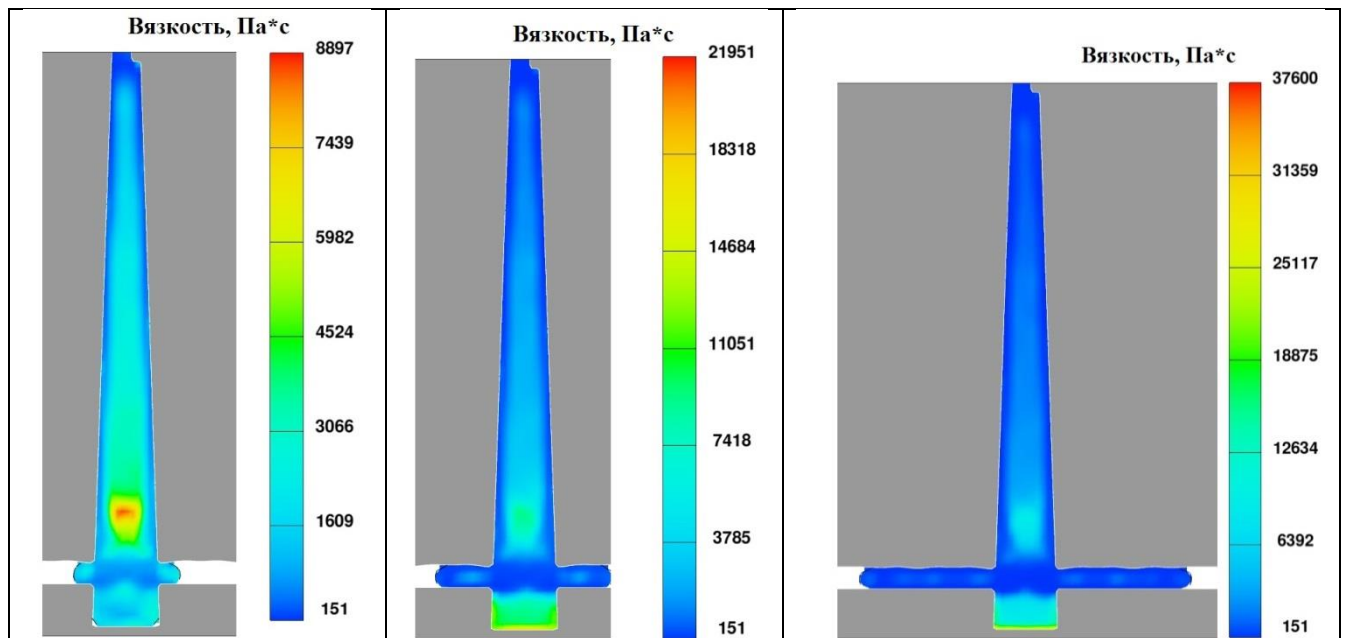


Рисунок 4.11 – Конфигурация разводящего канала

Канал представляет собой изогнутый контур, который способствует снижению вязкости шликера в процессе его заполнения. Длина прямолинейных участков до 5 мм, а угол перегиба участков 25° . Профиль разводящего канала выбран полукруглого сечения радиусом 2,5 мм согласно общеизвестным рекомендациям для простоты изготовления в одной половине формы сферической фрезой и своим динамическим показателям.

На рисунке 4.12 представлен расчет изменения вязкости в разводящем канале для изделия «Шептало».



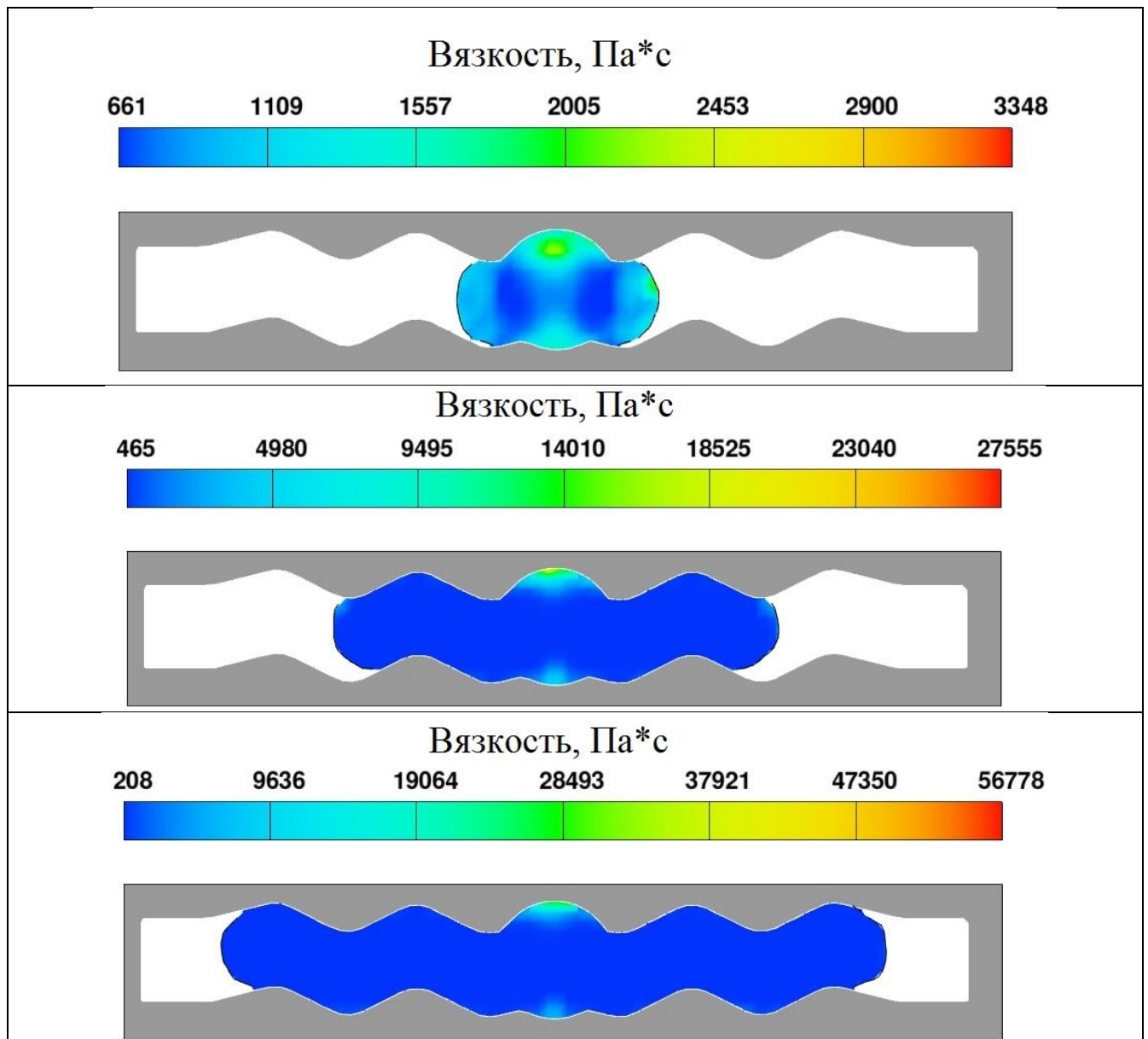


Рисунок 4.12 – Расчет разводящего канала

В начале заполнения разводящего канала вязкость шликера 661 Па*с, а в процессе его заполнения вязкость снизилась до 208 Па*с. Таким образом шликер подготовлен к его подачи в полость формы.

4.2 Подбор технологического режима литья под давлением

Качество изделий, получаемых литьем под давлением шликера, зависит главным образом от правильного выбора технологических режимов. Основными технологическими параметрами в процессе заполнения являются скорость и дав-

ление. Скорость определяет равномерность заполнения полости формы, а давление плотность сформированной отливки.

Процесс выбора режима прессования зависит от конфигурации отливки и конструкции литниковой системы. Конечно, впрыск должен происходить как можно быстрее, но часто рекомендуют ступенчатый профиль скорости в процессе заполнения. Если старые машины могли производить впрыск только при постоянной скорости, то современные машины обладают не только различными скоростями, но и мягкими переходами между фазами впрыска посредством профиля в форме ломаных линий. К таким машинам относится и witman battenfeeld/smart power 50, на которой проводились исследования.

В некоторых случаях подбор режима заполнения сможет скорректировать неточности проектирования элементов литниковых систем в готовой оснастке. Оснастка для изготовления изделия шептало уже была изготовлена, и на производстве изделия получались с рядом дефектов. На рисунке 4.13 (а,б) представлены внутренние дефекты в виде пористости в массивных узлах.

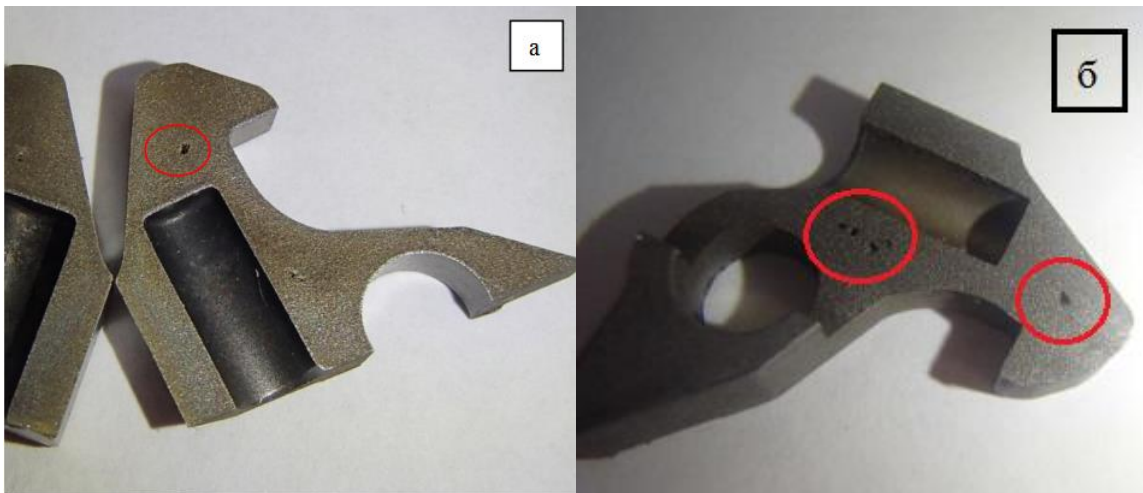


Рисунок 4.13 – Поры в массивных узлах «Шептало»

Также в массивных узлах образуются рыхлота 1, неслитины 3 и расслоение в месте впуска шликера в форму в виде трещин 2, рисунок 4.14.

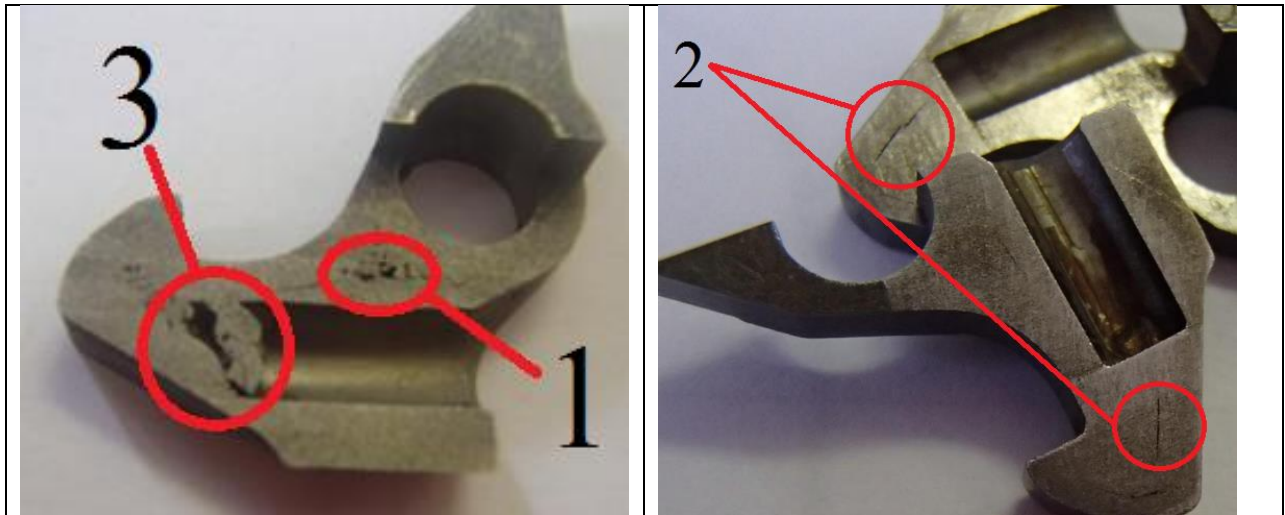


Рисунок 4.14 – Рыхлота, неслитины и трещины в массовных узлах
«Шептало»

Причинами получения подобных дефектов являются струйное течение при впуске шликера в полость детали, завышенная скорость впуска. Подбор технологического режима прессования позволит урегулировать плавность заполнения полости формы.

4.2.1 Заполнение полости формы с постоянной скоростью

Для начала рассмотрим режим заполнения при постоянной скорости. Наиболее интересны места, где образуются дефекты. Первое такое место в массивном узле, куда подводится шликер. На рисунке 4.15 показан характер заполнения массивного узла при скорости заполнения $10 \text{ см}^3/\text{с}$.


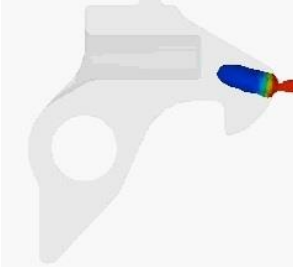
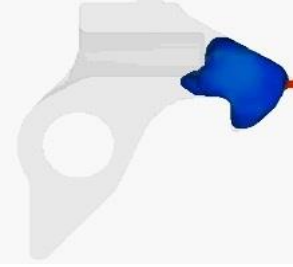
№	1	2	3
Моделирование			



Рисунок 4.15 – Заполнение первого массивного узла

Моделирование и эксперимент показали, что при данной скорости заполнения шликер струей попадает в массивный узел, где происходит замешивание воздуха. Вследствие этого в массивном узле образуется раковина, рисунок 4.16.



Рисунок 4.16 – Раковина в массивном узле 1

Вторая область заполнения – узкое сечение, переходящее в массивную часть отливки, рисунок 4.17.

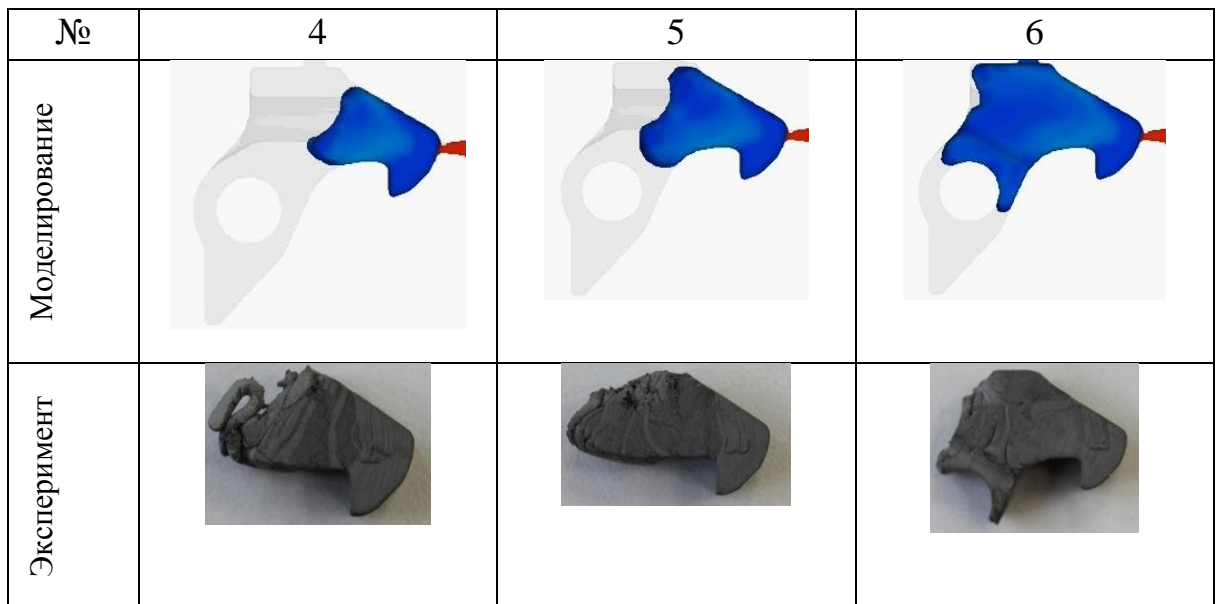


Рисунок 4.17 – Заполнение второго массивного узла

Плавность перехода от первого узкого места отливки ко второму массивному узлу позволила заполнить узел без образования струйного течения шликера. Соответственно на данном участке, возможно, сохранить максимальную скорость заполнения.

Затем шликер заполнил второе узкое сечение отливки в области сквозного отверстия, где поток разделяется на две части, рисунок 4.18.

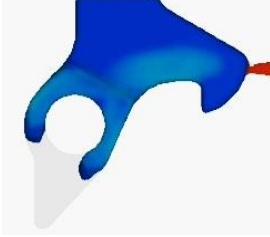
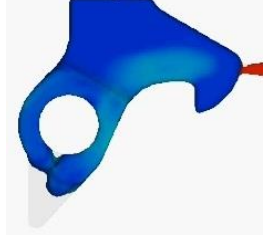


№	7	8
Моделирование		
Эксперимент		

Рисунок 4.18 – Заполнение третьего массивного узла

В массивном узле 3 разделившийся поток вновь сходится и возникает риск образования дефекта в виде неслитин или ниспаев. Поэтому с одной стороны необходимо увеличивать скорость потока шликера, а с другой стороны при выходе с узкого места образуется две струи потока, которые приводят к запиранью воздушной полости, рисунок 4.19.



Рисунок 4.19 – Захват воздуха в массивном узле 3

Получение отливки шептало с постоянной скоростью заполнения шликера, приведёт к образованию дефектов в виде захвата воздуха. Поэтому рассмотрим ступенчатый режим заполнения полости формы.

4.2.2 Ступенчатый режим заполнения

Как уже было сказано, отливка «Шептало» имеет три массивных узла, изолированных между собой узкими каналами. Для обеспечения равномерного заполнения всей полости отливки рекомендовано использовать ступенчатый режим заполнения. Разделим куст с отливками на объемные доли заполнения, рисунок 4.20.

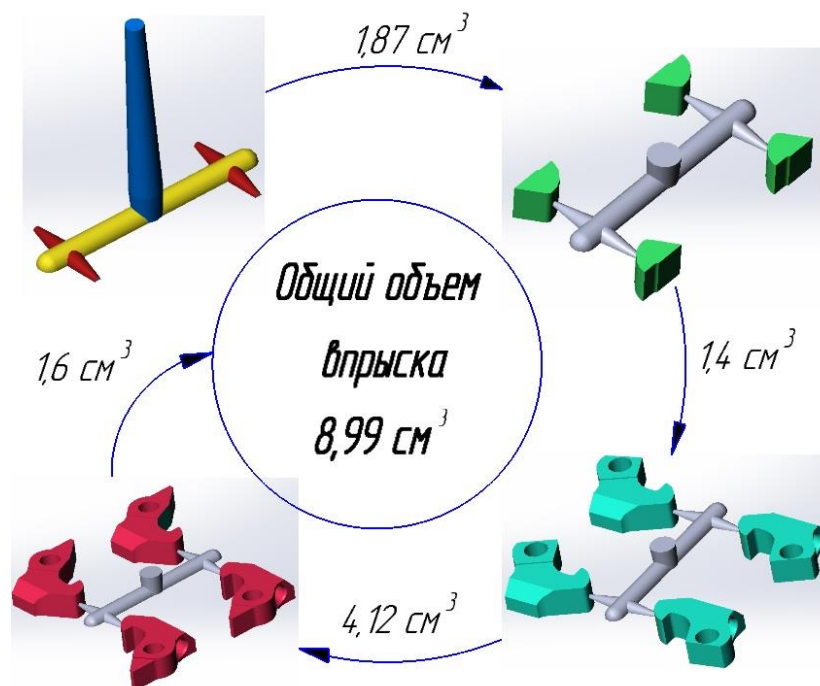


Рисунок 4.20 – Ступени заполнения отливки «Шептало»

В первую очередь заполняется литниковая система объемом 1,87 см³. Она заполняется с максимальной скоростью 10 см³/с. После чего шликер попадает в первую массивную часть, рисунок 4.21, общий объем которой равен 1,4 см³, где расход шликера снижается до 2 см³/с.

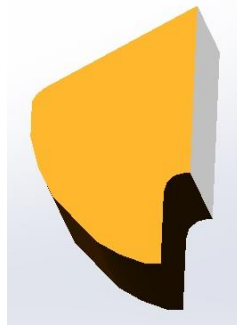


Рисунок 4.21 – Массивный узел 1

После заполнения первого массивного узла скорость заполнения увеличивается до $10 \text{ см}^3/\text{с}$ и заполняется первое узкое сечение в отливке плавно переходящее в массивный узел 2. В пункте 4.2.1 показано, что струйного течения при максимальной скорости заполнения в данном узле не образуется, поэтому с максимальной скоростью происходит впрыск ещё $4,12 \text{ см}^3$, рисунок 4.22.



Рисунок 4.22 – Массивный узел 2 и узкие сечения отливки

После заполнения второго узкого места в отливке остается заполнить последний массивный узел с общим объемом $1,6 \text{ см}^3$, рисунок 4.23. Скорость заполнения массивного узла $2 \text{ см}^3/\text{с}$.

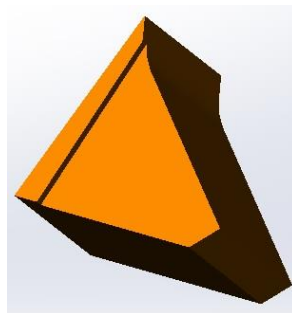


Рисунок 4.23 – Массивный узел 3

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 4.24.

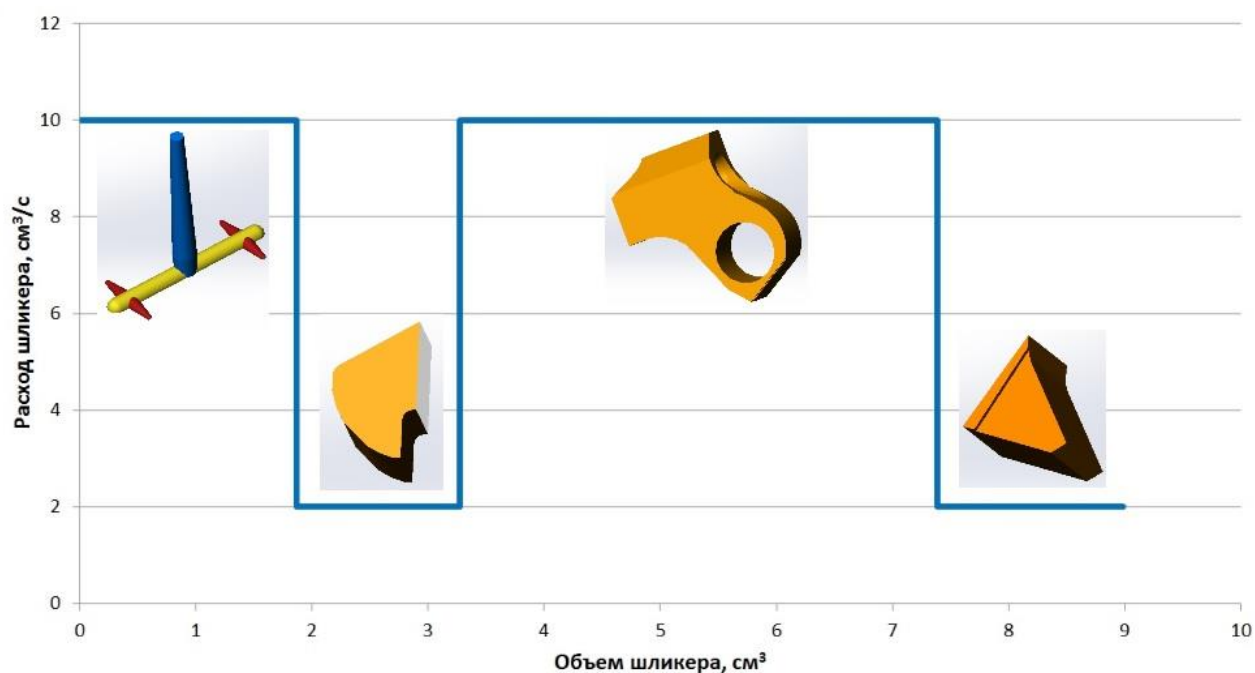


Рисунок 4.24 – Ступенчатый режим заполнения полости формы

Отливка, полученная по данному режиму заполнения формы, представлена на рисунке 4.25.



Рисунок 4.25 – Шпталы при ступенчатом заполнении

Подобранный режим заполнения полости формы позволил получать отливки без дефектов.

4.3 Проверка разработанной методики и импорт замещение шликера

Во второй главе диссертации были рассмотрены реологические характеристики шликера 40ХМА, которые являются аналогом зарубежного шликера 42CrMo4. Поскольку изделие «Шептало» является элементом оружейной промышленности, то задача импорт замещения очень актуальна. В связи с этим актуальна задача сравнения физико-механических свойств разработанного шликера 40ХМА и его зарубежного аналога 42CrMo4. Образцы для исследований получены по одной и той же методике с одинаковыми технологическими параметрами.

4.3.1 Исследование механических свойств образцов из шликера 40ХМА

Для изготовления изделий «Шептало» использовался шликер 40ХМА и 42CrMo4. Химический состав шликера представлен в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Химический состав шликера

Марка стали	C, %	Cr, %	Mo, %	Fe, %
40ХМА	0,38-0,45	0,9-1,20	0,15-0,30	Основа
42CrMo4	0,35 - 0,41	0,9 – 1,2	0,15 – 0,30	Основа

По химическому составу шликеры идентичные. Существенным отличием является то, что в шликере 40ХМА используется металлический порошок большей фракции, что значительно снижает себестоимость изделия.

4.3.1.1 Исследование твердости поверхности

Исследование твердости относится к методам неразрушающего контроля механических свойств материала при статической нагрузке. Для определения по-

верхностной твердости была изготовлена опытная партия деталей «Шептало». Толщина стенки этих деталей составляет порядка 6 мм, вес каждой детали не превышает 10 грамм, максимальный габаритный размер равен 17 мм.

Твердость испытываемых деталей измеряли по ГОСТ9450-76 на автоматическом микротвердомере для определения микротвердости Emco-test Durascan, рисунок 4.26.

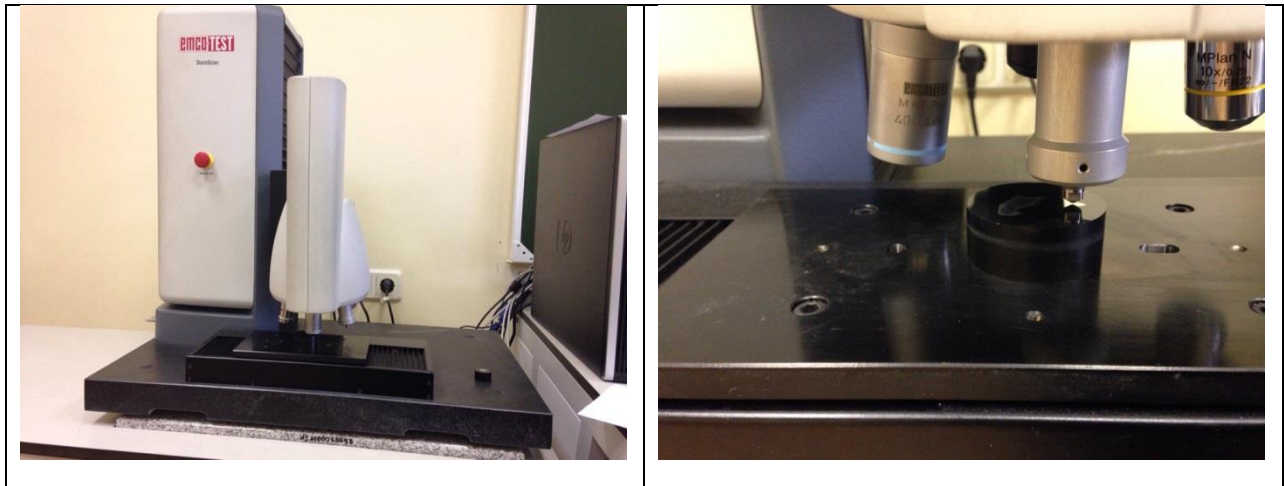


Рисунок 4.26 – Микротвердомер Emco-test Durascan

Согласно ГОСТ, поверхность деталей предварительно шлифовалась до значений $R_a = 0,32$ мкм. Измерения проводились в восьми точках образца. Образцы для измерения представлены на рисунке 4.27.

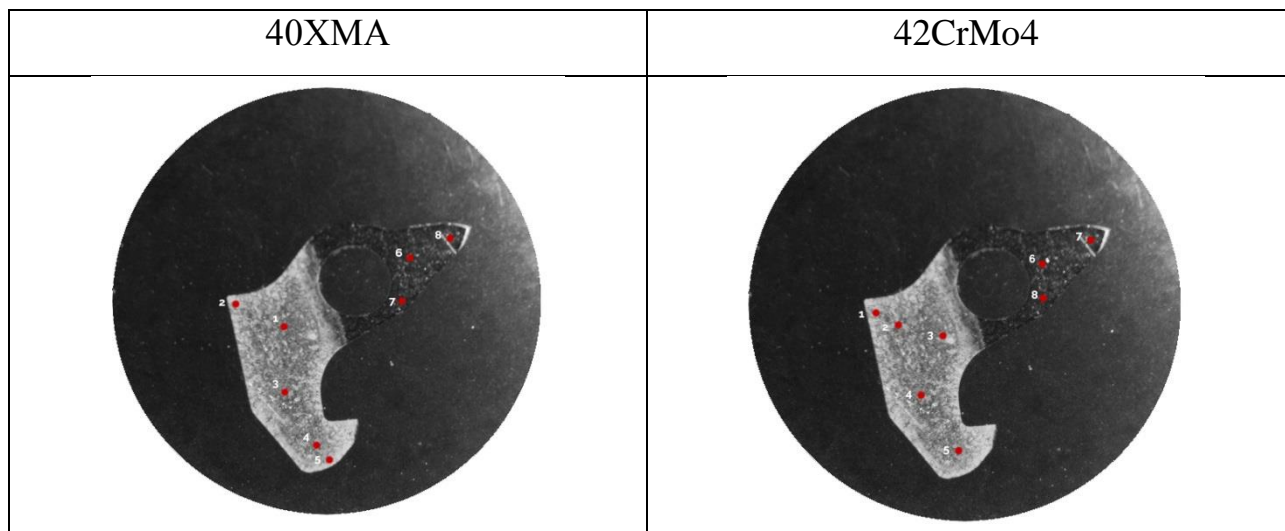


Рисунок 4.27 – Образцы для исследования твердости

В таблице 4.5 представлены результаты измерений. Твердость образцов из 40ХМА лежит в пределах 205 – 298 HV1. Полученные значения находятся в рекомендованном диапазоне для шликера 42CrMo4.

Таблица 4.5 – Результаты измерения твердости

№	40ХМА	42CrMo4	Описание нахождения точки на плоскости шлифа
	Твёрдость по Виккерсу HV	Твёрдость по Виккерсу HV	
1	205	262	Травленая, белая область
2	229	257	Травленая, тёмная область
3	225	289	Травленая, белая область
4	245	304	Травленая, тёмная область
5	224	295	Травленая, белая область
6	298	301	Не травленая, белая область
7	245	257	Не травленая, белая область
8	236	257	Не травленая, белая область

Образец из 42CrMo4 имеет твердость немного больше по сравнению с образцом из 40ХМА, но полученные значения твердости лежат в зоне допуска по техническому заданию.

4.3.1.2 Исследование шероховатости поверхности

Параметр шероховатости поверхности относится к микрогеометрии детали и определяет её важные эксплуатационные свойства. Прежде всего, износостойкость от истирания, прочность, внешний вид и плотность соединений. Для исследования шероховатости детали «Шептало» было выбрано две рабочие поверхности. Первая область – исследование шероховатости на носике, а вторая в массивной части детали, рисунок 4.28.

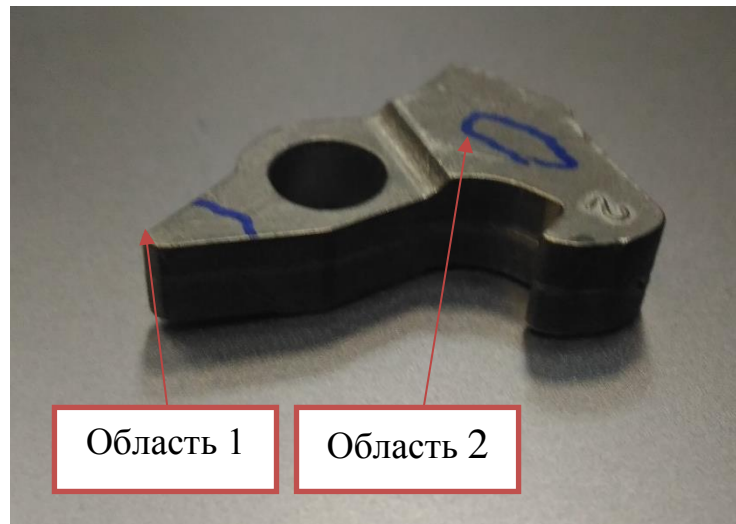


Рисунок 4.28 – Поверхности измерения шероховатости

Исследование шероховатости производилось на портативном профилометре Surtronic 128, рисунок 4.29. Это высокоточный прибор, предназначенный для измерения профиля поверхности на предмет неровностей.



Рисунок 4.29 – Прибор измерения шероховатости

Результаты измерения шероховатости представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Результаты измерения шероховатости

№ измерения	№ образца	Результаты измерения			
		Ra, мкм	Rz, мкм	Rz1max, мкм	Rq, мкм
Поверхность №1*					
1	40ХМА	2,99	16,40	19,40	3,80
2		2,63	14,30	17,50	3,20
3		2,42	13,80	15,90	3,10

		Поверхность №2**				
4		2,14	10,50	13,60	2,70	
5		2,17	10,80	14,40	2,70	
6		2,16	10,70	14,70	2,70	
		Поверхность №1				
7	42CrMo4	1,85	10,60	14,00	2,40	
8		1,93	11,10	14,50	2,40	
9		2,28	11,80	13,20	2,80	
		Поверхность №2				
10		2,11	10,50	13,10	2,60	
11		2,22	11,00	13,70	2,70	
12		2,01	11,50	15,20	2,60	

* Поверхность №1 – носик детали

** Поверхность №2 – массивная часть детали

Среднее значение шероховатости поверхности образцов из термопластичного шликера 40ХМА незначительно выше шероховатости Catamold 42CrMo4. Это может быть связано с использованием более крупной фракции металлического порошка.

4.3.2 Исследование микроструктуры

Для оценки микроструктуры из нескольких деталей «Шептало» были изготовлены микрошлифы с помощью шлифовально-полировальной системы подготовки образцов Tegamin-25, Struers (Дания), рисунок 4.30.



Рисунок 4.30 – Прибор для подготовки образцов

Для сравнения шлифы были изготовлены из шликера 42CrMo4 и 40ХМА. Для получения микроструктуры использовался универсальный лазерный атомно-эмиссионный спектрометр модели СПЕКС ЛАЭС МАТРИКС («Спектроскопические системы», Россия).

Результаты полученных микроструктур показаны на рисунке 4.31.

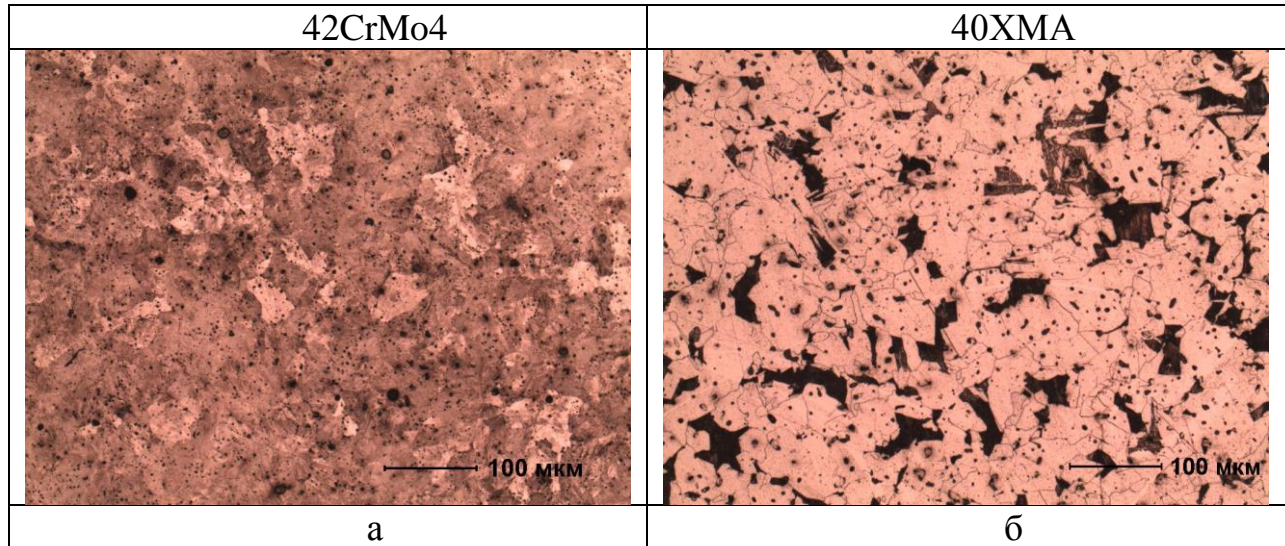


Рисунок 4.31 – Микроструктура деталей из разных шликеров
Сравнивая микроструктуру деталей из шликера 42CrMo4 на рисунках 4.19 (а) и 4.19 (б), нетрудно убедиться в их сходстве. Микроструктура деталей из шликера на основе стали 40ХМА имеет отличия.

Проведенный лазерный атомно-эмиссионный спектральный анализ в соответствии с ГОСТ Р 54153-2010 показал, что основное отличие заключается в том, что детали из шликера 40ХМА имеют феррито - перлитную структуру, т.е. структуру, образованную в результате равновесного распада аустенита в углеродистых сталях с содержанием углерода менее 0,8%. Детали же из шликера 42CrMo4 имеют перлитную структуру, т.е. эвтектоидную смесь феррита и цементита. Эти различия объясняют и различия в механических свойствах, в частности, предела прочности.

Структура феррит с перлитом является наиболее распространенной среди углеродистых доэвтектоидных сталей. Она характерна практически для всех конструкционных сталей.

4.3.3 Томографический контроль опытных образцов «Шептало»

Томографический контроль – это один из способов неразрушающего контроля на наличие скрытых дефектов в отливке, таких как газовые раковины, трещины, замешивание воздуха в расплав. В рамках диссертационной работы при поддержке НИИ КМиТП МГТУ им. Н.Э.Баумана с помощью системы компьютерной томографии GE VX M300, рисунок 4.32.



Рисунок 4.32 – Томограф GE VX M300

Результаты томографического контроля подтвердили, что в процессе заполнения формы с постоянным расходом шликера $10 \text{ см}^3/\text{с}$ в областях массивных узлов отливки образуются воздушные полости, рисунок 4.33.

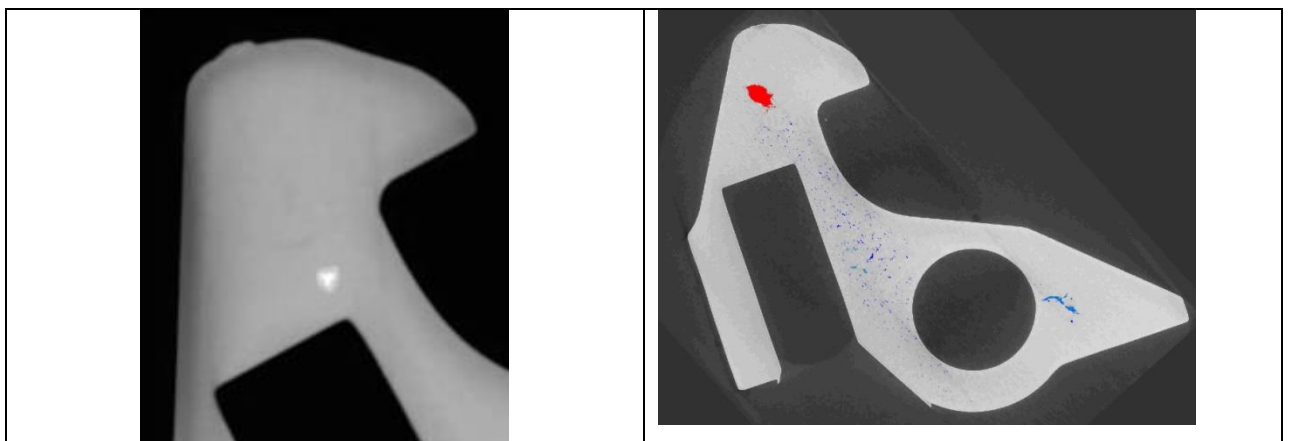


Рисунок 4.33 – Томография отливки «Шептало»

В области массивного узла наблюдается одно явно выраженное пространство с воздушным карманом, также распределение воздушных пустот в направлении заполнения до второго узкого места в отливке. А в массивном узле 3, как и

предполагалось, появилась полость в результате схлопывания двух потоков шликера.

Выводы по четвертой главе

1. Разработанные рекомендации для расчета литниковой системы литья термопластичного шликера применимы к различным конфигурациям отливок.
2. Конфигурации некоторых отливок требуют дополнительного подбора технологических параметров литья под давлением для заполнения формы.
3. Полученные отливки «Шептало» по разработанным технологическим параметрам литья соответствуют требованиям технического задания.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

PIM	– Powder Injection Molding (ПИМ-технология)
MIM	– Metal Injection Molding (МИМ-технология)
SIM	– Ceramic Injection Moulding (СИМ-технология)
ПОМ	– полиацеталь
ПВД	– полиэтилен высокого давления
N_V	– число контактов частиц
K	– координационное число
n	– число частиц порошка в единица объема
$\rho_{см}$	– плотность смеси
ρ_0	– плотность порошка
D_c	– диаметр сопла ТПА
D_1	– диаметр на входе литника
D_2	– диаметр на выходе литника
r_2	– радиус скругления
t_{max}	– максимальная толщина отливки
L	– длина литника
α	– угол конуса литника
V	– объем впрыска шликера
ϑ	– скорость течения шликера в центральном литнике
τ	– время
$f_{р.к.}$	– площадь разводящего канала
$P_{р.к.}$	– периметр разводящего канала
G	– масса детали
$D_{р.к.}$	– диаметр разводящего канала
$f_{в.к.}$	– площадь впускного канала
$n_{в.к.}$	– количество впускных каналов
F	– сила
V	– скорость
Q	– расход
ΔP	– перепад давления
η	– вязкость
γ	– скорость сдвига
ω	– постоянная угловая скорость ротора
R_2	– радиус ротора
M_1	– момент вращения
φ	– угол
m	– постоянная материала
τ^*	– напряжение сдвига
T	– температура

η_0	– вязкость при бесконечно малых скоростях сдвига
η_∞	– вязкость при больших скоростях сдвига
λ	– характеристическая константа с размерностью времени
<i>ГПУ</i>	– гексагональная плотнейшая упаковка
k	– коэффициент плотности упаковки
$V_{яч}$	– объем элементарной ячейки
R	– радиус сферического порошка
N	– количество порошка в элементарной ячейке объема
l_{min}	– минимальная толщина стенки отливки
d	– диаметр частицы порошка
s	– поперечная площадь канала
D'	– диаметр струи после выхода из канала
N_1	– первая разность нормальных напряжений
σ_{max}	– максимальное напряжение сдвига
x_i	– значение фактора на верхнем и нижнем уровнях
x_{0i}	– основной уровень фактора
Δx_i	– интервал варьирования фактора
<i>ТПА</i>	– термопластавтомат
<i>ЛС</i>	– литниковая система

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hohmann M., Brooks G., Spiegelhauer C. Production methods and applications for highquality metal powders and sprayformed products. Produktions methoden und Anwendungen fur qualitativ hochwertige Metallpulver und spruhkompaktierte Halbzeuge. Stahl und Eisen 125 (2005) Nr. 4.
2. Tsantrizos P. G. et. al. Method of production of metal and ceramic powders by plasma atomization. Pat. US № 5707419, дата выдачи: 13 янв 1998.
3. Инжекционное формование сложных деталей «МІМ технология» [Электронный ресурс] // Группа компаний «Калашников» [сайт]. – URL: <https://api.kalashnikovgroup.ru/upload/iblock/8c4/8c40cf8daf045c14bd7d7cf52deb650a.pdf> (дата обращения: 12.02.2020).
4. История и причины создания композиционных материалов [Электронный ресурс] // Полимерные композиционные материалы (полимерные композиты, ПКМ): [сайт]. – URL: <http://p-km.ru/vvedenie-v-pkm/istoriya-i-prichiny-sozdaniyakompozicionnyh-materialov.html> (дата обращения: 24.06.2019).
5. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015 №1 (34). С. 3–33.
6. Булавин И.А., Августиник А.И., Жуков А.С. и др. Технология фарфорового и фаянсового производства. Москва. Легкая индустрия. – 1975 – 448 с.
7. Майстренко А.Л., Формирование высокоплотной структуры самосвязанного карбида кремния [Текст] / А.Л. Майстренко, В.Г. Кулич, В.Н. Ткач // Сверхтвердые материалы. – Киев: Институт сверхтвердых материалов им. В.Н.Бакуля, 2009 – № 1 – С. 18-35.
8. Новые материалы в технике. Андреев Н.Х., Малахов А.И., Фуфаев Л.С. / издательство «высшая школа» москва —1967 г., 1-368 стр.

9. Берлин, А.А. Полиоксиметилены : учеб. пособие / А.А. Берлин. – М.: Наука, 2008. – 286 с
10. Литье порошковых смесей [Электронный ресурс] // Портал индустрии пластмасс «Пластикс»: [сайт]. URL: <https://www/plastics.ru/pdf/journal/2013/06/Pogodina.pdf> (дата обращения: 19.05.2019).
11. Научно-техническая технология инжекционного порошкового формования металлических изделий (МИМ-технология) / А.В. Пархоменко, А.П. Амосов, А.Р. Самбурок // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2012. - № 12. – С. 8-13
12. Пархоменко А.В. Развитие связующих веществ в гранулятах для МИМ-технологии // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2013. №2. С. 91–98.
13. Погодина Е. Литье порошковых смесей // Пластикс. Эффективные ТПА. 2013. №6 (124). С. 34–36.
14. Г. Гастров. Конструирование литьевых форм в 130 примерах / Э. Линднер, П. Угнер; под ред. А.П. Пантелеева, А.А. Пантелеева. – СПб.: Профессия, 2006. – 336 стр.
15. Пархоменко, А.В. Зависимость свойств стальных заготовок от содержания связующих веществ в МИМ-грануляте [Текст] / А.В. Пархоменко [и др.] // Новое слово в науке и практике: Гипотезы и апробация результатов исследований. – Самара: Центр развития научного сотрудничества, 2016 – № 23 – С. 66-72.
16. Bilovol V. V. Mould filling simulations during powder injection moulding / Ph. D. Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands – 2003. -142 с.
17. Mohammad Behi HIGH SOLID LOADING AQUEOUS BASE METAL/CERAMIC FEEDSTOCK FOR INJECTION MOLDING // A Dissertation Submitted to the Faculty of New Jersey Institute of Technology In Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Doctor of Philosophy // Department of Materials Science and Engineering - August 2001
18. KhairurRijal JAMALUDIN, Norhamidi MUHAMAD, Sufizar AHMAD, MohdHalimIrwan IBRAHIM, Nor Hafiez MOHD NOR and Yusof DAUD Injection

- moulding temperature and powder loading influence to the metal injection moulding (MIM) green compact Scientific Research and Essays Vol. 6(21), pp. 4532-4538, 30 September, 2011 Available online at <http://www.academicjournals.org/SRE>
19. Xiangji Kong. Development and characterization of polymer- metallic powder feedstocks for micro-injection molding. Other. Universit_e de Franche-Comt_e, 2011. English
 20. Donald F. Heaney Handbook of metal injection molding - Woodhead Publishing Limited. – 2012. – 586 с.
 21. Майстренко А.Л., Формирование высокоплотной структуры самосвязанного карбида кремния [Текст] / А.Л. Майстренко, В.Г. Кулич, В.Н. Ткач // Сверхтвердые материалы. – Киев: Институт сверхтвердых материалов им. В.Н.Бакуля, 2009 – № 1 – С. 18-35.
 22. Жуковский С.С. Прочность литейной формы. М.: Машиностроение, 1989. 288 с. : ил.
 23. Л. Фейш Тот. Расположение на плоскости, на сфере и в пространстве. — М.: Физматгиз, 1958
 24. В. М. Сидельников. О плотнейшей укладке шаров на поверхности n-мерной евклидовой сферы и числе векторов двоичного кода с заданным кодовым расстоянием. Доклады АН СССР, 1973, т. 213, № 5, с. 1029–1032.
 25. Е. П. Барановский. Упаковки, покрытия, разбиения и некоторые другие расположения в пространствах постоянной кривизны. Итоги науки. «Алгебра. Топология. Геометрия». 1967 г. — М.: ВИНТИ, 1969, с. 189–225.
 26. Keith Murray, Andrew J Coleman, Toby A Tingskog, Donald T WhychellSr Effect of Particle Size Distribution on Processing and Properties of MIM 17-4PH July 2011 International Journal of Powder Metallurgy 47(4)
 27. Juan M. Adames CHARACTERIZATION OF POLYMERIC BINDERS FOR METAL INJECTION MOLDING (MIM) PROCESS A Dissertation Presented to The Graduate Faculty of The University of Akron December, 2007
 28. Грабой, И.Э. Материалы Catamold компании BASF для литья под давлением [Текст] / И.Э. Грабой, А. Thom // Сборник трудов научно практического семинара

«Новые материалы и изделия из металлических порошков. Технология. Производство. Применение». – 2005 – С. 71-74.

29. Сколковский Институт Науки и Технологий: Публичный аналитический доклад по направлению «Новые производственные технологии» 2015
30. Khoong Ling Eng Numerical and Experimental Investigations of Thermal Debinding Process in Powder Injection Molding School of Mechanical & Aerospace Engineering, 2006
31. M. Jenni and T. Wilfinger, "PIMSIM: optimisation of powder injection moulding using advanced moulding simulations," Powder Metallurgy, vol. 52, pp. 279-281, 2009.
32. Marie-Aude Porter Effects of Binder Systems for Metal Injection Moulding – Master is thesis, Lulea University of Technology – 2003: 266 с.
33. MohdAfian Omar and IstikamahSubuki Sintering Characteristics of Injection Moulded 316L Component Using Palm-Based Biopolymer Binder Sintering Methods and Products
34. Nannan Guo, Ming C.Leu, Additivemanufacturing: technology, applicationsandresearchneedsFront. Mech. Eng. 2013, 8(3): 215–243.Li Jing, Myant Connor, Wu Bily, The current landscape for additive manufacturing research. A review to map the UK’s research activities in AM internationally and nationally.2016 ICL AMN report.
35. Petzoldt F. Managing quality in the complete Metal Injection Moulding process chain, PIMInternational, Vol8, No. 2, June 2014, 37-45.
36. Phan-Thien N. Understanding viscoelasticity: Basics of rheology. – Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2002. - 145 p.; Riande E., Diaz-Calleja R., Prolongo M.G., Masegosa R.M., Salom C. Polymer viscoelasticity: Stress and strain in practice. - N.Y., Basel: Marcel Dekker, 2000. - 879 p.
37. Polymer processing instabilities: Control and understanding / Ed. by S.G. Hatzikiakos, K.B. Migler. - Boca Raton, London, N.Y.: CRC Press (Taylor & Francis Group), 2005. - 488 p.
38. R. J. Phillips, et al., "A constitutive equation for concentrated suspensions that accounts for shear-induced particle migration," Physics of Fluids A: Fluid Dynamics, vol. 4, pp. 30-40, 1992.

39. R. Surace, G. Trotta, V. Bellantone and I. Fassi The Micro Injection Moulding Process for Polymeric Components Manufacturing // New Technologies Trends, Innovations and Research, 2012
40. Rong Zheng, Roger I. Tanner, Xi-Jun Fan., Injection Molding, Integration of Theory and Modeling Methods DOI 10.1007/978-3-642-21263-5
41. Г. Менгес, В. Микоэли, П. Морен, Как делать литьевые формы, 2007. – 612 с.
42. Калинин Э. Л., Калинин Е. И., Саковцева М. Б. Оборудование для литья пластмасс под давлением: Расчет и конструирование — М.: Машиностроение, 1985 — 256 с., ил.
43. Басов Н.И., Брагинский В.А., Казанков Ю.В. Б275 Расчет и конструирование формующего инструмента для изготовления изделий из полимерных материалов: Учебник для вузов. - М.: Химия, 1991. - 352 е.: ил. ISBN 5-7245-0665-3
44. Bin Lin, Meiming Zhang, Chuhan Wu and Feng Liu Optimization and Simulation for Ceramic Injection Mould of ZrO₂ Fiber Ferrule Some Critical Issues for Injection Molding
45. C. J. Hwang and T. H. Kwon, "A full 3D finite element analysis of the powder injection molding filling process including slip phenomena," Polymer Engineering & Science, vol. 42, pp. 33-50, 2002.
46. C. W. Macosko, *RHEOLOGY Principles, Measurements, and Applications*. New York: WILEY-VCH, 1994.
47. Catamold Feedstock for Metal Injection Molding: Processing - Properties – Applications Режим доступа http://www.catamold.de/cm/internet/Catamold/en_GB/content/Microsite/Catamold/Technische_Informationen_/Catamold_Processing (дата обращения 03.01.2018).
48. В.Ф. Наумов, Г.З. Наумова Производство изделий из пластических масс литьем под давлением. – 1958. – 126с.
49. Виноградов Г.В., Малкин А.Я. Реология полимеров – М.: Химия, 1977. – 438 с.
50. I. Duretek, C. Holzer Material Flow Data for Numerical Simulation of Powder Injection Molding Universal Journal of Materials Science 5(1): 7-14, 2017

51. Catamold Feedstock for Metal Injection Molding.URL:
http://www.catamold.de/cm/internet/en/function/conversions:/publish/content/Microsite/Catamold/Technische_Informationen_/Verfahrensanweisungen/GeneralProcessingInstructions_Catamold_MIM.pdf (дата обращения 13.10.2018)
52. SEONG-JIN PARK, YUNXIN WU, DONALD F. HEANEY, XIN ZOU, GUOSHENG GAI, and RANDALL M. GERMAN Rheological and Thermal Debinding Behaviors in Titanium Powder Injection Molding The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2008 DOI: 10.1007/s11661-008-9690-3
53. Tan Koon Tatt INFLUENCES OF TEMPERATURE AND PRESSURE TO THE GREEN DEFECTS International Journal of Mechanical Engineering and Technology Volume 10, Issue 1, January 2019 pp. 186–192
54. Thornagel, M. Injection molding simulation: New Development sofferre wards for the PIM industry, PIM International, Vol 6, No. 1, January 2012, 65-68.
55. Thornagel, M. Injection molding simulation: New Developments offer rewards for the PIM industry, PIM International, Vol 6, No. 1, January 2012, 65-68.
56. Ahn, S., Park, S.J., Lee, S., Atre, S.V. & German, R.M. (2009). Effect of powders and binders on material properties and molding parameters in iron and stainless steel powder injection molding process. Powder Technology, Vol.193, No.2, (July 2009), pp.162-169, ISSN 0032-5910.
57. Технология переработки полимеров. Физические и химические процессы: учебное пособие для вузов / М. Л. Кербер [и др.] ; под редакцией М. Л. Кербера. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 316 с.
58. Эберт Г. Краткий справочник по физике: справочное издание/ пер. со 2-го нем. изд. [Н. М. Шикунинной]; под ред. К. П. Яковлева. М.: Физматгиз, 1963. 552 с.
59. Бахрушин В. Е. Методы оценивания характеристик нелинейных статистических связей // Системные технологии. — 2011. — № 2(73).— С. 9—14. Ершов Э.Б. Распространение коэффициента детерминации на общий случай линейной регрессии, оцениваемой с помощью различных версий метода наименьших квадратов (рус., англ.) // ЦЭМИ РАН Экономика и математические методы. — Москва: ЦЭМИ РАН, 2002. — Т. 38, вып. 3. — С. 107-120. Ершов Э.Б. Выбор регрессии

максимизирующий несмещённую оценку коэффициента детерминации (рус., англ.) // Айвазян С.А. Прикладная эконометрика. — Москва: Маркет ДС, 2008. — Т. 12, вып. 4. — С. 71-83.

60. Самборук, А.Р. Исследование импортного гранулята 42CrMo4 для МИМ-технологий [Текст] / А.Р. Самборук [и др.] // Вестник Самарского Государственного технического университета: технические науки. — Самара: на базе СГТУ, 2014 — № 4 — С. 93-98.

61. В.Ф. Наумов, Г.З. Наумова Производство изделий из пластических масс литьем под давлением. — 1958. — 126с.

62. Витязь П.А., Ильющенко А.Ф., Савич В.В. Порошковая металлургия в мире и в Беларуси: 1990 – 2010. Состояние, проблемы, перспективы // Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка. 2011 г. Часть 1:/ред. кол.: П.А. Витязь [и др.].- Мн.: ГНУ «Институт порошковой металлургии», 2011.- 384 с. Режим доступа: <http://www.science.by/upload/iblock/8d6/8d6cb8196f803d666004f9cc692e823a.pdf> (дата обращения 09.01.2017).

63. F. Ilinca, et al., "Metal injection molding: 3D modeling of nonisothermal filling," Polymer Engineering & Science, vol. 42, pp. 760-770, 2002.

64. F. Ilinca, et al., "Three- dimensional filling and post-filling simulation of metal injection molding," Journal of Injection Molding Technology, vol. 6, pp. 229-238, 2002.

65. F. Ilinca, et al., "Three-dimensional numerical modeling of segregation in powder injection molding," presented at the Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials, Las Vegas, 2009.

66. S. Turenne, "Détermination des propriétés rhéologiques de mélanges de poudre de IN625 et de liant pour simulation numérique dans ProCAST," Pratt & Whitney Canada, Internal Report, 2007.

67. V. V. Bilovol, et al., "The effect of constitutive description of PIM feedstock viscosity in numerical analysis of the powder injection moulding process," Journal of Materials Processing Technology, vol. 178, pp. 194-199, 2006.

68. Xiangji Kong. Development and characterization of polymer- metallic powder feedstocks for micro-injection molding. Other. Universit_e de Franche-Comt_e, 2011. English
69. Y. Thomas, et al., "Development of titanium dental implant by MIM : Experiments and simulation," presented at the Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials, Las Vegas, 2009.
70. Yottha Srithep, B.S. A study on material distribution, mechanical properties, and numerical simulation in co-injection molding a Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in the Graduate School of The Ohio State University, 2008
71. Бибик Е.Е. Реология дисперсных систем. – Л.: Изд-во Ленингр. Ун-та, 1981. – 172 с. Ил. – 64, библиогр. – 92 назв.
72. Гуль В.Е., Кулезнев В.Н. Структура и механические свойства полимеров. – М.: Лабиринт, 1994. – С. 332.
73. Нильсен Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций. – М.: Химия. 1978. – С. 281.
74. Z. S. Zheng and X. H. Qu, "Numerical simulation of powder injection moulding filling process for intricate parts," Powder Metallurgy, vol. 49, pp. 167-172, 2006.
75. Z. Zheng, et al., "Numerical simulation of tungsten alloy in powder injection molding process," Transactions of Nonferrous Metals Society of China, vol. 18, pp. 1209-1215, 2008.
76. Zhu Z., Wang S.-Q. Experimental characterization of extrudate swell behavior of linear polybutadiene // J. Rheol. 2004. V. 48. - P. 571-589
77. Самборук, А.Р. Исследование импортного гранулята 42CrMo4 для МИМ-технологий [Текст] / А.Р. Самборук [и др.] // Вестник Самарского Государственного технического университета: технические науки. – Самара: на базе СГТУ, 2014 – № 4 – С. 93-98.
78. Дежина, И.Г. Публичный аналитический доклад по направлению «Новые производственные технологии» [Текст]: доклад / И.Г. Дежина [и др.]. – М.: Сколковский Институт Науки и Технологий, 2015. – 210 с

79. Публичный аналитический доклад по направлению «Новые производственные технологии» // Сколковский институт науки и технологий. – Январь 2015. – Режим доступа <http://maginnov.ru/assets/files/analytics/publicchnyj-analiticheskij-doklad-po-napravleniyunovye-proizvodstvennyye-tehnologii.pdf> (дата обращения 31.12.2017).
80. Новые материалы и изделия из металлических порошков. Технология. Производство. Применение (ТПП-ПМ2005). 21-24 июня 2005 г. г.Йошкар-Ола, стр.37-40.
81. Муранов, А.Н. Исследование свободной усадки основных типов полимерно-порошковых смесей, применяемых для изготовления деталей из порошковых аналогов стали 38ХМА (42CrMo4) МИМ-методом [Текст] / А.Н. Муранов [и др.] // Механика композиционных материалов и конструкций. – Москва, Институт прикладной механики Российской Академии наук, 2019 – Том 25 – № 1 – С. 76-86.
82. CatamoldFeedstockforMetalInjectionMolding.URL:
http://www.catamold.de/cm/internet/en/function/conversions:/publish/content/Microsite/Catamold/Technische_Informationen_/Verfahrensanweisungen/GeneralProcessingInstructions_Catamold_MIM.pdf (дата обращения 13.10.2018)
83. Catamold® 42CrMo4 Режим доступа [http://www.catamold.de/cm/internet Catamold/en_GB/content/Microsite/Catamold/Technische_Informationen_/Catamold_Produktdatenblaetter](http://www.catamold.de/cm/internet/Catamold/en_GB/content/Microsite/Catamold/Technische_Informationen_/Catamold_Produktdatenblaetter) (дата обращения 03.01.2018)
84. Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. Справочник по физике. 1978.
85. Воларович М. П. Работы Пуазейля о течении жидкости в трубах (К столетию со времени опубликования) // Известия Академии наук СССР. Серия физическая. 1947, Т. 11, № 1
86. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. — М.: ГХИ, — 1961. — 831 с.
87. Крупа А.А., Городов В.С. Химическая технология керамических материалов. Киев. Выща школа. – 1990 – 399 с.
88. Лапшин В.В. Основы переработки термопластов литьем под давлением. - М.: Химия, 1974. - 270 с.

89. Ивженко В.В., Исследование упругого последствия при инъекционном литье термопластичных масс на основе порошков SiC, AlN, WC и его влияния на механические свойства материала заготовок изделий [Текст] / В.В. Ивженко [и др.] // Сверхтвердые материалы. – Киев: Институт сверхтвердых материалов им. В.Н.Бакуля, 2009 – № 1 – С. 49-57.
90. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепция, методы, приложения / Пер. с англ. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2010. – 560 стр., ил.
91. Малкин А.Я., Куличихин С.Г. Реология в процессах образования и превращения полимеров. – М.: Химия, 1985. – С. 332.
92. Малкин А.Я., Леонов А.И. Реология – концепции, методы приложения. – СПб.: Профессия, 2007. – 557 с.
93. I.Subuki, Z.Abdullah, R. Razali, M.H. Ismail Rheological study of feedstock for Ni Tialloy molded parts.
94. Joamin Gonzalez-Gutierrez, Gustavo BeulkeStringari, Igor Emri / Powder Injection Molding of Metal and Ceramic Parts
95. John P.Beaumont, Runner and Gating design Handbook. Munich, Germany. Hanser Publishers, 2004.
96. Juan M. Adames CHARACTERIZATION OF POLYMERIC BINDERS FOR METAL INJECTION MOLDING (MIM) PROCESS A Dissertation Presented to The Graduate Faculty of The University of Akron December, 2007
97. Herning E., Zipperer L. Calculation of the Viscosity of Technical Gas Mixtures from the Viscosity of the Individual Gases. Gas und Wasserfach, vol. 79, 1936, pp. 69–73.
98. Hagen G., Über die Bewegung des Wassers in engen cylindrischen Röhren // Poggendorff's Annalen, 1839, Bd. 46, S. 423–442
99. Эберт Г. Краткий справочник по физике: справочное издание / под ред. К. П. Яковлева. — пер. со 2-го нем. изд. Н. М. Шикунинной. — М. : Физматгиз, 1963. — 552 с.
100. Sutura S.P., Skalak R. The history of Poiseuille's law // Annual review of fluid mechanics. — 1993. — Т. 25. — С. 1–19.

101. S. K. Samanta, et al., "A numerical study of solidification in powder injection molding process," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, pp. 672-682, 2008.
102. Басов Н.И., Брагинский В.А., Казанков Ю.В. Б275 Расчет и конструирование формующего инструмента для изготовления изделий из полимерных материалов: Учебник для вузов. - М.: Химия, 1991. - 352 е.: ил. ISBN 5-7245-0665-3
103. S. Turenne, "Conditions de moulage de mélanges de poudre de IN625 et de liant et validation par simulation numérique dans ProCAST," Pratt & Whitney Canada, Internal Report, 2007.
104. Технология переработки полимеров. Физические и химические процессы : учебное пособие для вузов / М. Л. Кербер [и др.] ; под редакцией М. Л. Кербера. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2021. — 316 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-04915-2. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/468286> (дата обращения: 24.08.2021)
105. Привалко В.П., Новиков В.В., Яновский Ю.Г. Основы теплофизики и реофизики полимерных материалов. – Киев: Наукова Думка, 1991. – 231 с.
106. Тагер А.А. Физикохимия полимеров / Под ред. А.А. Аскадского. – М.: Научный мир, 2007. – 576 с.
107. Годовский Ю.К. Теплофизика полимеров. – М.: Химия, 1982. – 280 с.
108. Липатов Ю.С. Физическая химия наполненных полимеров. – М.: Химия, 1977. – 304 с.
109. Калинин Э. Л., Калинин Е. И., Саковцева М. Б. Оборудование для литья пластмасс под давлением: Расчет и конструирование — М.: Машиностроение, 1985 — 256 с., ил.
110. Мэллой Р.А. Конструирование пластмассовых изделий для литья под давлением / пер. с англ. яз. под ред. В.А. Брагинского, Е.С. Цобкалло, Г.В. Комарова — СПб.: «Профессия», 2006. – 512 стр., ил.

111. Г. Гастров. Конструирование литьевых форм в 130 примерах / Э. Линднер, П. Унгер; под ред. А.П. Пантелеева, А.А. Пантелеева. – СПб.: «Профессия», 2006. – 336 стр.
112. Г. Менгес, В. Микоэли, П. Морен, Как делать литьевые формы, 2007. – 612 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ РАБОТЫ



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «ИНСТИТУТ ПЛАСТМАСС ИМЕНИ Г.С. ПЕТРОВА» (АО «ИНСТИТУТ ПЛАСТМАСС»)

111024, Российская Федерация
г. Москва, Перовский проезд, д.35
<http://instplast.ru>

Тел./факс: (495) 600-07-00, 600-07-67
E-mail: dir@instplast.ru

№ 4294/2019 от 26.12 2019 г.

« УТВЕРЖДАЮ »

На Ваш № _____ от _____ 201 _____ г.

Временный генеральный директор
АО «Институт пластмасс»



Г.И. Андреева

» 12 2019 г.

О ВНЕДРЕНИИ

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертационной работы Хилкова Дмитрия Эдуардовича, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.04 – «Литейное производство», были внедрены в деятельности АО «Институт пластмасс имени Г.С. Петрова».

К числу таких результатов относятся:

- разработка композиционных материалов на основе металлического порошка фракцией до 60 мкм и полимеров полиацеталь (ПОМ) и полиэтилен высокого давления (ПВД);
- разработаны рекомендации литья под давлением для получения литых заготовок и образцов для механических испытаний из материалов с тиксотропными свойствами.

Использование указанных результатов позволяет снизить стоимость изделий, получаемых по МИМ технологии и добиться их заданных служебных свойств.

Настоящий акт не является основанием для взаимных финансовых расчетов.

Директор НИИПМ

Т.Н. Прудскова



АО «Сумитомо (СХИ) Демаг Пластикс Машинери»
115477, Москва, ул. Кантемировская 65, помещение 1

Исход.№ 23 от 21.01.2020г.

АКТ
ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертационной работы Хилкова Дмитрия Эдуардовича, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.04 – «Литейное производство», были использованы в деятельности АО «Сумитомо (СХИ) Демаг Пластикс Машинери».

К числу таких результатов относятся:

- применение методики для расчета литниковой системы, обеспечивающей получение отливок без дефектов из металлических порошковых смесей (фидстоков);
- режимы литья фидстоков, обеспечивающие равномерное распределение плотности смеси по объему формы.

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

Настоящий акт не является основанием для взаимных финансовых расчетов.

And Slabin



Генеральный директор
АО «Сумитомо (СХИ)
Демаг Пластикс Машинери»
Дирк Шайбнер

АО «Сумитомо (СХИ) Демаг Пластикс Машинери»
ул. Кантемировская 65/1
115477, г. Москва
Россия
www.sumitomo-shi-demag.eu E-Mail info.plastservice@qpg.com

АО «СМ-Ю-Эф-Джи Банк (Евразия)»,
Москва
Р/сч. 4070281000000001324
БИК. 044525361
Корр/сч.30101810500000000361
ИНН/КПП 7731154256/772401001

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
Центрального ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт

НАМИ

АКТ

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертационной работы Хилкова Дмитрия Эдуардовича, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.04 – «Литейное производство», были использованы в деятельности ФГУП «НАМИ».

К числу таких результатов относятся:

- применение методики для расчета литниковой системы, обеспечивающей получение отливок типа «Шептало» из металлической порошковой смеси 40ХМА (42CrMo4) без дефектов;
- разработка технологических режимов литья изготовления отливки «Шептала»;
- разработка состава металлической порошковой смеси из отечественного порошка и полимеров для снижения себестоимости изделия «Шептало»
- изготовлена пробная партия изделий «Шептало» с приложенным отчетом об исследовании: шероховатости, твердости, плотности, размерной точности и механических свойств.

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

Настоящий акт не является основанием для взаимных финансовых расчетов.

Нач. ЛЦ ЗОК ЦТ
ФГУП «НАМИ»

НАЧ. ЛИТ. ЦЕНТРА
МОРОЗОВ В.В.
ФГУП НАМИ

В.В. Морозов