

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

На правах рукописи

Кожевников Сергей Игоревич

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ  
ПРЕСС-ФОРМ НА ОСНОВЕ ФОРМИРОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО  
МАКРОРЕЛЬЕФА ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ  
ФРЕЗЕРОВАНИИ НА СТАНКАХ С ЧПУ

2.5.6. Технология машиностроения

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Макаров Владимир Федорович

Пермь 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Глава 1. Состояние вопроса, цель и задачи работы.....	14
1.1 Конструкторско-технологические требования к изготовлению пресс-форм для литья изделий из полимерных композиционных материалов.....	14
1.2 Анализ проблем, возникающих при изготовлении и эксплуатации формообразующих поверхностей пресс-форм из закаленных сталей.....	19
1.3 Анализ литературы по разработке методов управления фрезерованием на станках с ЧПУ для повышения качества формообразующих поверхностей пресс-форм.....	27
1.4 Анализ литературы по разработке методов повышения износостойкости и долговечности формообразующих поверхностей пресс-форм .....	33
1.5 Анализ производственного опыта повышения износостойкости и показателей качества при изготовлении деталей пресс-форм .....	36
1.6 Анализ литературы по исследованию механизма движения вязкотекучих материалов в закрытых полостях с различной шероховатостью поверхностей .	40
1.7 Выводы по первой главе. Цель работы и задачи исследований .....	44
Глава 2. Теоретическое обоснование и моделирование влияния процесса формирования макрорельефа на формообразующих поверхностях по высоте и направлению на производительность, качество и износостойкость пресс-форм ..	47
2.1 Теоретическое обоснование влияния макрорельефа на формообразующих поверхностях по высоте и направлению на качество и износостойкость обработанной поверхности методом профильного фрезерования концевыми сферическими фрезами.....	47
2.2 Обоснование влияния макрорельефа формообразующих поверхностей на движение высоковязкой жидкости в закрытых полостях.....	52

2.3 Математическое моделирование влияния формирования макрорельефа на формообразующих поверхностях с различной траекторией фрезерования на равномерность заполнения различных полостей пресс-форм и алгоритм выбора рациональной траектории фрезерования для каждой конкретной полости .....	59
2.4 Установление закономерности влияния направленности макрорельефа формообразующих поверхностей на технологические параметры литья изделий из полимерных композиционных материалов в пресс-форме .....	85
2.5 Выводы по второй главе.....	95
Глава 3. Разработка методического обеспечения проведения экспериментальных исследований влияния направленного формирования макрорельефа на формообразующих поверхностях при фрезеровании на износостойкость пресс-форм.....	96
3.1 Выбор материалов и образцов для экспериментальных исследований .....	96
3.2 Выбор оборудования, инструмента и программное обеспечение экспериментальных исследований .....	100
3.3 Разработка методики проведения измерений шероховатости, износа и производительности технологического цикла литья .....	106
3.4 Планирование экспериментальных исследований .....	110
3.5 Выводы по третьей главе .....	114
Глава 4. Результаты экспериментальных исследований влияния применения рациональной траектории фрезерования на качество и износостойкость пресс-форм.....	116
4.1 Результаты экспериментальных исследований по установлению функциональных взаимосвязей .....	116
4.2 Результаты последовательного проектирования изделий пресс-форм и разработки управляющих программ ЧПУ для внедрения новой технологии	

фрезерования формообразующих поверхностей на примере детали «Заглушка» .....	130
4.3 Результаты применения новой технологии программирования фрезерной обработки формообразующих поверхностей в зависимости от направления движения расплава в различных полостях пресс-форм.....	136
4.4 Результаты влияния новой технологии направленного формирования макрорельефа на формообразующих поверхностях при фрезеровании на качество, производительность и износостойкость пресс-форм.....	145
4.5 Выводы по 4 главе.....	155
Глава 5. Разработка технологических рекомендаций по внедрению новой технологии фрезерования для создания рационального макрорельефа на формообразующих поверхностях литейных пресс-форм.....	157
5.1 Разработка алгоритма выбора рациональной траектории фрезерования для формообразующих поверхностей пресс-форм.....	157
5.2 Результаты практической реализации новой технологии фрезерования пресс- форм на предприятиях.....	160
5.3 Экономическая оценка эффективности внедрения новой технологии направленного формирования макрорельефа при фрезеровании на формообразующих поверхностях.....	161
5.4 Перспективные направления дальнейшего развития применения новой технологии направленного фрезерования формообразующих поверхностей...	163
5.5 Выводы по пятой главе.....	165
Заключение .....	166
Список литературы .....	169
Приложение 1 .....	190
Приложение 2 .....	191
Приложение 3 .....	192

## Введение

**Актуальность темы диссертации.** В современных условиях создание наукоемких изделий все чаще связано с органическими материалами, основой которых являются полимеры – синтетические или природные высокомолекулярные соединения. Для соответствия требованиям, которые предъявляются к изделиям в машиностроении, к таким высокомолекулярным соединениям добавляют армирующие волокна, улучшающие физико-механические и эксплуатационные свойства полимерных композиционных материалов (ПКМ). Использование деталей из ПКМ, связано с тем, что такие материалы имеют уникальные сочетания характеристик и свойств. Рост количества применяемых деталей из ПКМ в таких областях промышленности, как военная промышленность, транспорт, авиастроение, приборостроение, радиотехника, электроника, строительство, медицина и др., показывает нам перспективу исследований оборудования, инструмента и процессов, применяющихся в изготовлении изделий из ПКМ.

Тенденция использования деталей из ПКМ для снижения энергетических затрат и производственных ресурсов увеличивает номенклатуру деталей сложной геометрической формы. Получение готового продукта из ПКМ сопровождается сложным процессом технологической подготовки производства, и чем сложнее геометрия детали, тем сложнее формообразующая оснастка для таких деталей. Бурное развитие машиностроительного производства и постоянное повышение качества выпускаемых изделий приводят к постоянному повышению требований к выпускаемой специализированной формообразующей оснастке. В современном машиностроении одним из самых перспективных в мировой практике и экономичных способов крупносерийного и массового производства деталей из ПКМ является литье под давлением в литейные пресс-формы, изготовленные из закаленных сталей. Применение этого способа позволяет получать геометрически сложные изделия высокой точности и качества. Однако широкое применение этой высокоэффективной технологии литья деталей из ПКМ сдерживается из-за

проблем повышенного абразивного изнашивания формообразующих поверхностей пресс-форм твердыми частицами стекла или углеволокна, входящими в состав расплава для повышения прочности ПКМ и движущихся в момент заполнения пресс-формы с большой скоростью и с высоким давлением. Влияние абразивного изнашивания на формообразующие поверхности пресс-формы приводит к увеличению частоты ремонтов и ухудшению качества изготавливаемых изделий, ввиду этого изготовление пресс-форм и обработка формообразующих поверхностей имеет важное значение для машиностроительной отрасли.

Пресс-форма накладывает определенные ограничения на конструкцию деталей. Наличие в деталях отрицательных углов, различных отверстий сложной формы и поднутрений усложняет конструкцию пресс-формы. Присутствие в пресс-форме различных конструктивных элементов в виде подвижных и неподвижных формообразующих деталей, таких как вставка, пуансон, матрица и прочих, усложняет эксплуатацию пресс-форм и влияет на их износостойкость. В процессе технологического цикла литья армированный волокном расплав в виде ПКМ движется в полостях пресс-форм, интенсивно изнашивая формообразующие поверхности.

Опыт в сфере разработки и изготовления геометрически сложной формообразующей оснастки показывает, что производство такой оснастки, а именно формообразующих деталей, чаще всего значительно превышает трудоемкость проектирования и изготовления получаемого в результате работы формообразующей оснастки изделия. Таким образом задача повышения износостойкости пресс-форм является актуальной и имеет как научную, так и практическую значимость.

**Степень разработанности темы исследования.** В настоящее время известны примеры получения рационального макрорельефа на криволинейных поверхностях и исследование его влияния на увеличение долговечности оснастки (I.Pahole, Мариборский университет). В том числе известны исследования влияния программируемой траектории и параметров фрезерования на качество изготавливаемой поверхности и время изготовления пресс-форм (R. Rama Krishna

Reddy, Технологический университет Джавахарлала Неру; В. Ramreddy, Технологический университет Висвесварая).

Известны примеры оптимизации процесса заполнения пресс-форм полимерными композиционными материалами, в том числе на примере статорной лопатки ГТД, технологии, что позволяет оптимально распределить армирующие волокна в изготавливаемом изделии (И.Н. Хаймович, Самарский государственный аэрокосмический университет им. ак. С.П. Королёва). Выявлено, что рациональный макрорельеф на формообразующих поверхностях может повышать долговечность технологической оснастки на треть, однако исследования влияния рационального макрорельефа на формообразующих поверхностях на износостойкость пресс-форм пока отсутствуют. Кроме того, в открытых литературных источниках на данный момент отсутствуют исследования влияния параметров формообразующих поверхностей, возникающих в процессе фрезерования, на время заполнения полостей пресс-форм.

**Цель работы** заключается в технологическом обеспечении повышения износостойкости пресс-форм на основе формирования высоты и направления макрорельефа на формообразующих поверхностях путем программирования траектории обработки сферическими монолитными фрезами на станках с ЧПУ.

Для достижения этой цели поставлены следующие **задачи**:

1. Проанализировать причины повышенного износа формообразующих поверхностей пресс-форм из закаленных сталей, обосновать влияние параметров макрорельефа, формируемого при фрезеровании концевыми фрезами, на износостойкость и время заполнения различных полостей сложных пространственных пресс-форм.

2. На основе математического моделирования формирования макрорельефа при фрезеровании оценить его влияние на время заполнения полостей пресс-форм. Рассчитать и обосновать наиболее рациональную траекторию движения фрезы в зависимости от размеров и геометрических параметров деталей пресс-форм с целью формирования макрорельефа, обеспечивающего в результате наименьшие

сопротивление потоку расплава, износ формообразующих поверхностей, равномерную скорость заполнения пресс-формы и остывания изделий.

3. Разработать методику проведения экспериментальных исследований по повышению износостойкости пресс-форм на основе формирования рационального макрорельефа на формообразующих поверхностях путем программирования траектории обработки сферическими монолитными фрезами на станках с ЧПУ.

4. Провести сравнительные экспериментальные исследования в лабораторных и производственных условиях по установлению влияния направления и высоты макрорельефа, формируемого в результате траектории движения фрезы при фрезеровании, на величину износа формообразующих поверхностей в процессе изготовления деталей из композиционных материалов и время заполнения пресс-форм, изготовленных по серийной заводской технологии, и пресс-форм, изготовленных по новой технологии направленного формирования рационального макрорельефа.

5. Провести экспериментальные исследования и получить эмпирические математические модели зависимости величины макрорельефа, величины шероховатости обработанной поверхности, величины времени заполнения полостей пресс-форм от параметров формообразующих поверхностей и режимов резания.

6. Разработать универсальный алгоритм подготовки управляющих программ фрезерования для станков с ЧПУ с учетом обеспечения рационального макрорельефа на профильных формообразующих поверхностях пресс-форм по заданному направлению траектории фрезерования.

7. Разработать технологические рекомендации и внедрить в производство новую технологию направленного формирования рационального макрорельефа формообразующих поверхностей.

**Объектом исследования** является макрорельеф, формируемый на формообразующих поверхностях пресс-формы.

**Предметом исследования** являются закономерности влияния высоты и направления макрорельефа на формообразующих поверхностях в различных



полостях пресс-форм различных размеров на износ и время заполнения пресс-форм.

**Научная новизна.** В диссертации получены следующие новые научные результаты.

1. Впервые на основе разработанных математических моделей установлены и обоснованы взаимосвязи между траекторией обработки формообразующих поверхностей при фрезеровании на станках с ЧПУ и износом деталей пресс-форм, что позволяет повысить износостойкость пресс-форм и производительность технологического цикла изготовления изделий на основе выбора рациональной траектории фрезерования.

2. Экспериментально подтверждено, что наиболее рациональным для обеспечения минимального времени заполнения полостей и снижения износа пресс-форм является направление макрорельефа на формообразующих поверхностях коллинеарно главному вектору течения расплава, что объясняется снижением потерь энергии на трение и местные сопротивления в процессе течения вязкого композиционного материала по формообразующим поверхностям пресс-форм.

3. Получены эмпирические математические модели, устанавливающие следующие зависимости:

– высоты макрорельефа от кривизны поверхности, величины поперечной подачи при фрезеровании и радиуса фрезы при обработке криволинейных сложных поверхностей;

– времени заполнения полостей от угла направления макрорельефа, высоты макрорельефа и шероховатости обрабатываемой поверхности;

– шероховатости от скорости резания, подачи и глубины резания при обработке пресс-форм из закаленных сталей 40Х13 и 38ХНМ.

### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в:

1. Теоретическом обосновании влияния высоты и направления макрорельефа на формообразующих поверхностях на качество и износостойкость обработанной

поверхности методом профильного фрезерования концевыми сферическими фрезами.

2. Обосновании влияния макрорельефа на формообразующих поверхностях на движение высоковязкой жидкости в закрытых полостях.

3. Разработке методического обеспечения проведения экспериментальных исследований влияния направленного формирования макрорельефа на формообразующих поверхностях при фрезеровании на износостойкость пресс-форм.

Практическая значимость заключается в следующем:

1. Для технологической подготовки производства пресс-форм разработан алгоритм создания управляющих программ для станков с ЧПУ с рациональной траекторией движения концевой сферической фрезы, учитывающий геометрические параметры формообразующей поверхности пресс-формы, позволяющий повысить износостойкость деталей пресс-форм и увеличить производительность технологического цикла литья.

2. Разработаны управляющие программы для фрезерования для станков с ЧПУ с учетом направления траектории фрезерования, обеспечивающие рациональный макрорельеф на формообразующих поверхностях деталей пресс-форм и снижение их износа.

3. Результаты работы внедрены на предприятиях «ПК Дэми» и «Пермский крепеж» (г. Пермь) при производстве 38 наименований пресс-форм по новой технологии. В результате изготовления этих пресс-форм произведено более 9 млн деталей, при этом износ пресс-форм снизился на 45 %, производительность технологического цикла повысилась на 25 %, а себестоимость изготовления деталей из ПКМ снизилась на 20–30%. При внедрении годовой экономический эффект составил более 15 млн руб.

4. Результаты работы были использованы при выполнении Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (N FSNM-2020-0026) и внедрены в учебный процесс ФГАОУ ВО «Пермский национальный

исследовательский политехнический университет» при подготовке студентов по дисциплинам «Технология машиностроения» и «Резание материалов».

**Методология и методы исследования.** Результаты диссертационной работы получены с использованием новейших программных комплексов САПР: SolidWorks, SolidWorksPlastics, SolidWorksSimulation, Компас-3D, CAD/CAM/CAE-система Unigraphics, система математического моделирования MathCad, на основе использования фундаментальных положений резания материалов и технологии машиностроения, основных положений математической статистики, методов математического и компьютерного моделирования и системного анализа процессов в машиностроении, а также методов постановки полного факторного эксперимента.

Экспериментальные и теоретические исследования выполнены в условиях промышленного производства с применением современного оборудования, вертикально-фрезерных обрабатывающих центров HAAS, аттестованных приборов и инструментов.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Технология фрезерования формообразующих поверхностей, учитывающая траекторию потока движения расплава по формообразующим поверхностям пресс-форм, создающая при фрезеровании по траектории программируемой коллинеарно главному вектору течения расплава макрорельеф, способствующий снижению времени заполнения пресс-форм и повышению износостойкости.

2. Взаимосвязь направления макрорельефа на обработанных формообразующих поверхностях в полостях пресс-форм различных размеров на износ и время заполнения пресс-форм.

3. Эмпирические математические модели, устанавливающие следующие зависимости:

– высоты макрорельефа от кривизны поверхности, величины поперечной подачи при фрезеровании и радиуса фрезы при обработке криволинейных сложных поверхностей;

– времени заполнения полостей различной конфигурации от угла направления макрорельефа, высоты макрорельефа и шероховатости обрабатываемой поверхности;

– шероховатости от скорости резания, подачи и глубины резания при обработке пресс-форм из закаленных сталей 40X13 и 38ХНМ.

4. Алгоритм для создания управляющих программ для станков ЧПУ, учитывающий геометрические параметры формообразующей поверхности пресс-формы и направление макрорельефа на формообразующих поверхностях, для снижения износа и времени заполнения пресс-форм.

**Степень достоверности.** Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается корректно выбранными и примененными методиками научного исследования, статистическим анализом экспериментальных данных и совпадением теоретических результатов и результатов практической реализации технологии.

**Личный вклад.** Автором лично сформулированы цели и задачи исследований, проведен теоретический анализ и моделирование заполнения полостей с различным направлением макрорельефа. Проведены экспериментальные исследования, изготовлены пресс-формы и обработаны результаты исследований. Разработаны технологические рекомендации и алгоритм для внедрения новой технологии направленного формирования макрорельефа. Подготовлены доклады для конференций различного уровня.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты выполненной работы докладывались и обсуждались на конкурсе инновационных проектов в сфере передовых производственных технологий TechNet «Большая разведка» – 2 место; в рамках XVI Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации» (г. Пермь, 2015, 2018, 2021); международной научно-технической конференции «Современные высокоэффективные технологии и оборудование в машиностроении» (г. Санкт-Петербург, 2016); на международном симпозиуме технологов-машиностроителей «Перспективные направления развития финишных методов обработки деталей»

(Ростов-на-Дону, 2016); в материалах статей издания «Известия Тульского государственного университета. Технические науки» (г. Тула, 2016, 2017); «Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия Прогрессивные технологии в машиностроении» (г. Волгоград, 2017); на VI Международной научно-практической конференции «Автоматизированное проектирование в машиностроении» (г. Новокузнецк, 2018); XXV Международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» (г. Севастополь, 2018); на научном симпозиуме «Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий» (г. Ростов-на-Дону, 2021).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, три из которых опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, одна работа в издании, входящим в наукометрическую базу данных Scopus.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов по работе, списка использованных источников, включающего 175 наименований, и трех приложений. Работа изложена на 192 страницах машинописного текста, содержит 75 рисунков, 41 таблицу и 105 формул.

## Глава 1. Состояние вопроса, цель и задачи работы

### 1.1 Конструкторско-технологические требования к изготовлению прессформ для литья изделий из полимерных композиционных материалов

Современное машиностроение во всех отраслях промышленности сопряжено с использованием деталей сложной геометрической формы с криволинейными поверхностями. Такие детали, часто имеющие большую массу при высокой металлоемкости, приводят к повышенным вибрациям и уровню шума при эксплуатации, а также не соответствуют экологическим требованиям при производстве. Перспективным направлением является замена материалов геометрически сложных деталей на ПКМ, что позволяет повысить качество и производительность получения изготавливаемой продукции, снизить материалоемкость и себестоимость, повышая конкурентоспособность предприятий в современных условиях [16; 68; 108].

В настоящее время наблюдается устойчивый рост объема производства изделий из ПКМ. В машиностроении постоянно открываются новые ниши для использования ПКМ (таблица 1.1) [108]: изготовление втулок, подшипников, направляющих и вкладышей, шкивов, блоков, колес и роликов из материалов антифрикционного назначения, производство корпусов, кронштейнов, ступиц из материалов с повышенными требованиями по прочности, а также шестерен, звездочек и червячных колес из виброустойчивых материалов [22; 35].

Как правило, при конструировании изделий перед технологом стоит сложнейшая задача выбора из огромной номенклатуры материалов того материала, который наиболее полно отвечал бы необходимым требованиям. Зачастую главным конкурентом сталей и сплавов в машиностроении являются ПКМ, так как они имеют ряд неоспоримых преимуществ как по эксплуатационным, так и по экономическим показателям. Возможность производства деталей из ПКМ позволяет получать изделия с заданными физико-механическими и эксплуатационными свойствами, такие детали часто производятся с большей

производительностью, имеют сравнительно меньшую массу и меньшую энергозатратность, что дает ощутимый экономический эффект.

Таблица 1.1 – Области применения ПКМ в машиностроении

Материал	Область применения
ПКМ на основе термопластичных связующих	
Полиэтилен высокой и низкой плотности	Заглушки, декоративные элементы, шланги, крышки, трубы, прокладки, фурнитура
Фторопласт	Уплотнители, арматура, подшипники
Поливинилхлорид	Трубы, шланги, прокладки, уплотнители
Поликарбонат	Детали светотехнических приборов
Полиамид	Шестерни, подшипники, муфты
Полипропилен	Корпуса, декоративные элементы
ПКМ на основе термореактивных связующих	
Фенопласты	Корпусные детали, винты, навигационное оборудование
Аминопласты	Электротехнические изделия
Стеклопластики	Корпусные детали
Органопластики	Корпусные детали авиастроения
Углепластики	Изделия широкого назначения
Боропластики	Силовые конструкции

Технологий производства деталей из ПКМ огромное множество. В процессе анализа технологий выделены несколько технико-экономических показателей способов формования деталей из ПКМ (таблица 1.2), которым были выставлены оценки от 1 до 10. Выбранный способ формования деталей из ПКМ – литье под давлением, использование которого полностью отвечает требованиям, предъявляемым к производству таких изделий для машиностроения [84; 104; 108; 111]. Применение такого способа характеризуется высокой производительностью получения изделий из ПКМ, высоким качеством, сокращением производственных

площадей для изготовления деталей, а также снижает требования к квалификации рабочих, что положительно влияет на себестоимость получаемых деталей.

Таблица 1.2 – Техничко-экономические показатели способов формирования изделий из ПКМ.

Способ формирования деталей из ПКМ	Стоимость оборудования	Производительность	Прочность изделий	Квалификация рабочего	Сложность изделия	Однородность детали
Ручное формование	1	3	3	10	9	1
Формование эластичной диафрагмой в вакууме	2	2	4	10	9	3
Напыление	4	4	3	10	8	1
Намотка	6	6	10	2	4	9
Пултрузия	7	9	9	2	2	10
Штамповка	10	8	7	4	9	10
Протяжка	10	10	5	2	1	10
Прессование	9	8	7	4	8	10
Литье под давлением	10	10	6	2	10	10

Литье под давлением позволяет получать детали крупносерийно, при этом готовое изделие часто не нужно подвергать дополнительной механической обработке. Низкая плотность ПКМ дает дополнительные преимущества, поскольку тенденция развития машиностроения характеризуется борьбой за уменьшение массы с одновременным повышением прочности деталей.

Одним из существенных преимуществ для различных отраслей машиностроения является то, что детали из ПКМ возможно изготавливать с применением красителей, получая детали различного цвета. Также для деталей из



ПКМ существуют различные добавки, которые могут повышать физико-механические свойства полимерного материала, а соответственно и эксплуатационные свойства изделий из ПКМ.

Развитие машиностроения характеризуется постоянной сменой номенклатуры применяемых деталей сложной криволинейной формы и повышением предъявляемых требований по точности и качеству, таким образом, применение изделий из ПКМ, имеющих уникальные химические и физико-механические свойства, при малом потреблении энергии для их изготовления делает актуальной задачу повышения качества и износостойкости пресс-форм.

Определены типовые конструкции, проанализированы требования к применяемым материалам и их твердости на рабочих частях пресс-формы (таблица 1.3) и предъявляемые технические требования к поверхностям пресс-форм (таблица 1.4) [36; 38; 39; 40; 43]. Главными формообразующими частями пресс-форм являются матрица, пуансон и вставки различных конфигураций. Как правило, матрица формирует наружную геометрию изделия, а пуансон внутреннюю, вставки в матрицу и пуансон применяют в том случае, если технологически целесообразно производить их обработку отдельно. Следует помнить, что каждая пресс-форма имеет определенные особенности, которые зависят от размера, сложности геометрической формы, материала, из которого и для которого изготавливается пресс-форма, а также возможности обработки на производственном оборудовании.

Увеличение номенклатуры изделий из ПКМ сложной криволинейной формы в различных областях машиностроения ведет к усложнению поверхностей формообразующих деталей пресс-форм, что влияет на трудоемкость формирования поверхностей пресс-форм при фрезеровании на многофункциональных станках с ЧПУ. Решение задачи повышения качества поверхности, снижения времени механической обработки формообразующих поверхностей пресс-форм на станках с ЧПУ имеет важную теоретическую и практическую ценность и является приоритетным направлением исследования.

Таблица 1.3 – Технические требования, предъявляемые к рабочим частям пресс-форм

Наименование деталей	Марка стали	Твердость формообразующих частей пресс-форм
Формообразующие детали простой конфигурации	У8А; У10А; 40Х13; 38ХНМ	45–50 НRC,
Формообразующие детали сложной конфигурации	40Х; 40Х13; 38ХНМ; ХВГ; 9ХС; 12ХН3А	50–61 НRC,
Знаки	9ХС; 65Г; Х12МФ	38–49 НRC,
Тонкие знаки и вкладыши	65Г; У8А; У10А	45–50 НRC,

Таблица 1.4 – Технические требования, предъявляемые к поверхностям пресс-форм

Поверхность	Шероховатость	Квалитет	Вид обработки
Поверхность разъема	Ra 1,6	H8; h8; H7; h7; H6; h6	Точение, фрезерование
Формообразующие поверхности	Ra 0,4	H7; h7; H8; h8	Шлифование, тонкое точение, тонкое фрезерование
Другие поверхности	Ra 6,3	H12; h12	Черновое точение, фрезерование

Точность исполнения и сборки пресс-форм должна быть высокой и не допускать смещения формообразующих поверхностей относительно друг друга по плоскости разъема, вследствие чего, как правило, происходит облой детали, что ведет к дополнительным операциям механической обработки после получения изделия после формовки, что приводит к увеличению трудоемкости получения изделия и влияет на себестоимость. Увеличение безотказной наработки и установленного ресурса и снижение количества плановых и капитальных ремонтов

является актуальной задачей, решение которой достигается повышением качества формообразующих поверхностей и износостойкости литейных пресс-форм.

## **1.2 Анализ проблем, возникающих при изготовлении и эксплуатации формообразующих поверхностей пресс-форм из закаленных сталей**

В результате предъявляемых требований к материалам и твердости к рабочим частям пресс-форм, а также техническим требованиям к поверхностям возникают сложности при чистовой механической и электроэрозионной обработке. Высокая твердость формообразующих деталей до 61 HRC, низкие показатели шероховатости  $Ra \leq 0,4$  мкм и высокая точность изготавливаемых деталей предъявляют повышенные требования к обрабатываемому инструменту и применяемому оборудованию для изготовления пресс-форм.

При механической обработке обрабатывающий инструмент должен обладать малым поверхностным трением, что обеспечивает сход стружки, предотвращение наростообразования и образования микротрещин, уменьшает силы резания и гарантирует высокое качество поверхности. Высокая твердость, высокопрочная основа, позволяющие повысить износостойкость инструмента и обеспечить увеличенную скорость резания даже в неблагоприятных условиях, повышенная стойкость, высокие показатели сопротивления выкрашиванию и образованию микротрещин на режущей кромке – это необходимый минимум требований, предъявляемых к обрабатываемому инструменту [3; 9; 18; 19; 98; 100; 101; 122]. Применяемое оборудование должно обеспечивать высокие значения подачи и скорости резания одновременно с отсутствием вибраций во время обработки. В свою очередь высокие скорости резания ограничивает производительность процесса фрезерования такая функциональная характеристика процесса обработки, как жесткость системы «станок – инструмент – приспособление – деталь» (СПИД). Недостающая жесткость системы СПИД может вызвать нежелательные вибрации во время обработки, что повлечет за собой погрешность формы и неточность

размеров обработанной детали. Жесткость станка зависит от конструкции его исполнения, а также от качества сборки элементов станка [87; 99; 131; 132].

В процессе обработки производительность может быть ограничена из-за неправильной эксплуатации инструмента. Неправильно подобранные режимы резания приводят к быстрому износу инструмента. Точность инструмента в процессе изнашивания снижается, что приводит к искажению его формы и размеров. В связи с этим износ инструмента существенно влияет на точность обработки. Значительное влияние на точность обработки оказывает нагрев технологической системы, например, нагревание шпинделя, в котором находится наибольшее количество источников тепловыделения. Постепенное нагревание при работе приводит к смещению оси шпинделя от исходного положения и может влиять на точность исполняемых размеров деталей пресс-форм.

Анализ деталей пресс-форм со сложными криволинейными формообразующими поверхностями показал, что они часто изготовлены из закаленных коррозионно-стойких сталей, обрабатываемость которых так или иначе относится к одним из самых важных вопросов в современном машиностроении. Наиболее часто применяемыми марками стали в производственных условиях являются стали 40X13 и 38XНМ либо их аналоги, это связано с наличием этих марок стали у поставщиков и доступностью инструмента для обработки таких материалов, обладающих высоким сопротивлением коррозии в агрессивных средах, прежде всего в атмосфере воздуха, паров воды и кислот [34; 55; 56; 102; 104; 112; 113]. Часто в процессе изготовления пресс-форму не делают полностью, существует много российских и зарубежных компаний, которые предоставляют готовые пакеты плит для пресс-форм в зависимости от габаритных размеров, определенных в конструкторской документации. В таком случае задача изготовления пресс-формы сводится к изготовлению формообразующих деталей из пакетных заготовок. Если российские компании отправляют пакет плит из российских сталей, то зарубежные компании используют немецкие, швейцарские и американские стали. Таблица зарубежных марок сталей применяемых для

изготовления пресс-форм, их российские аналоги и описание их применения представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Аналоги марок сталей и описание их применения

Россия	Германия	Швеция	США	Описание
45	1.1730	УНВ11	1148	Блоки, промежуточные плиты для литья под давлением
40ХГМА	1.2312	-	-	Литьевые формы и плиты
38ХНМ	1.2311	Impax	P20	Литьевые формы и плиты
	1.2738	Supreme		Литниковые втулки
Х12МФ	1.2379	Sverker21	D2	Литниковые втулки
40Х13	1.2085	Ramax2	420F	Детали литьевых форм, формообразующие детали, плиты
30Х13				

К материалам, применяемым для производства литейных пресс-форм, предъявляют высокие требования по обрабатываемости. Одним из распространенных методов для оптимизации процесса механической обработки является выбор рациональных режимов резания для каждой стадии обработки формообразующих поверхностей с учетом геометрических особенностей, припуска на заготовке, твердости и требуемой шероховатости формообразующей детали. Требования сводятся к тому, что необходимо уменьшить время на обработку деталей пространственно-сложной формы на многофункциональных станках с ЧПУ путем выбора оптимальных режимов резания и одновременно с этим повысить качество поверхности деталей для обеспечения минимизации слесарной доработки после операции фрезерования.

Электроэрозионная обработка сложных криволинейных поверхностей для пресс-форм является широко применяемой в машиностроении. Электроэрозионный инструмент в виде различного типа электродов позволяет обрабатывать материал высокой твердости, что является главным преимуществом технологии электроэрозионной обработки. Однако часто встречающаяся сложная

криволинейная формообразующая поверхность деталей литейных пресс-форм имеет самую разнообразную форму и расположение на формообразующих деталях литейных пресс-форм, что осложняет обработку, так как некоторыми методами электроэрозионной технологии невозможно получить сложную трехмерную криволинейную поверхность. В настоящее время технология электроэрозионного прошивного типа позволяет получать такие формообразующие детали литейных пресс-форм как матрицы и пуансоны, необходимого качества и точности с применением современного оборудования и инструмента. Для изготовления формообразующих деталей пресс-форм необходима низкая шероховатость, технология электроэрозионной обработки не может обеспечить требуемой величины, поэтому после операции электроэрозионной обработки требуется слесарная доработка формообразующих поверхностей. Однако для обработки сложных криволинейных поверхностей формообразующей оснастки нужно изготовить специальный электрод-инструмент, стоимость такого инструмента может превышать стоимость изготавливаемой формообразующей детали [2; 5; 6; 48; 90; 109; 130; 146; 147].

В зависимости от выполняемой операции и от формы обрабатываемой поверхности нужно учитывать коррекцию на электрод-инструмент. А именно размеры электрода-инструмента занижаются на величину коррекции для данного режима обработки. Для каждой выполняемой операции размер занижения должен считаться обособленно, в зависимости от режима обработки. Электрод-инструмент изготавливается чаще всего из меди или графита слесарно-механическим способом, по чертежу с учетом коррекции на величину межэлектродного зазора.

Процесс копировально-прошивной электроэрозионной обработки для изготовления сложных криволинейных поверхностей в основном зависит от выбора оптимальных режимов обработки, так как от тока разряда, длины импульса и формы тока разряда зависят промыв межэлектродного промежутка и производительность, а значит и шероховатость обработанной детали. На рисунке 1.1 показано соотношение между током разряда, интенсивностью обработки и износом электрода при обработке стальной заготовки. В основном при большом

токе разряда обработка происходит при большой скорости снятия материала, но также ускоряется износ электрода. При использовании разных режимов обработки износ графитового и медного электрода будет разным.

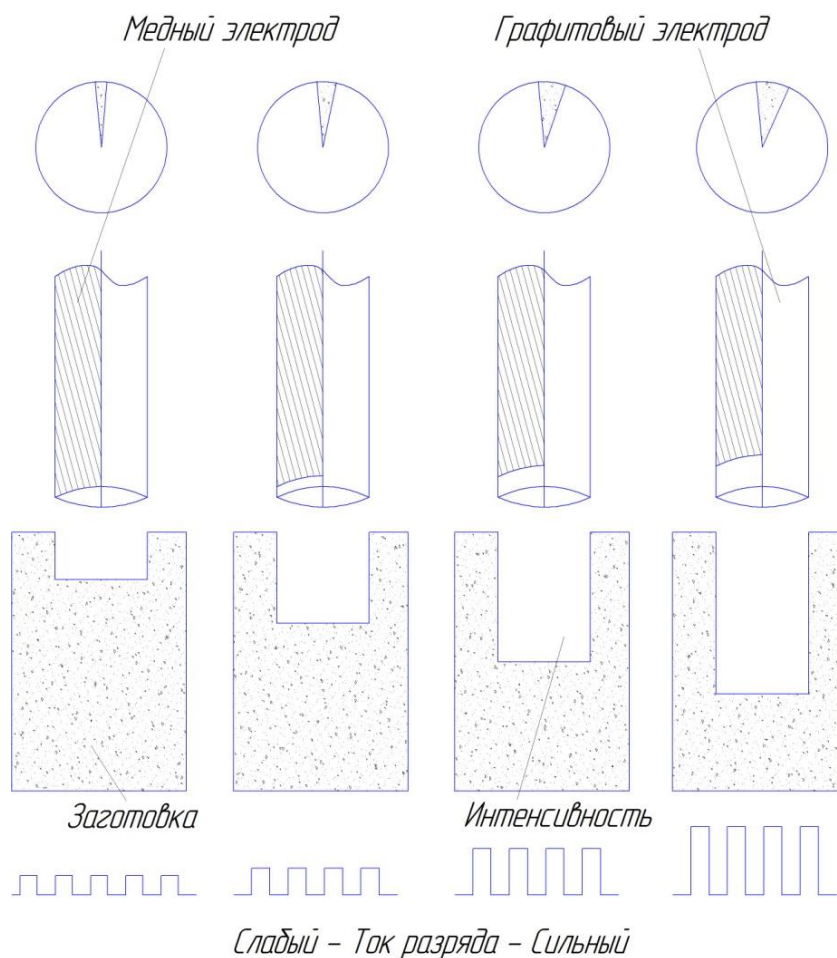


Рисунок 1.1 – Соотношение тока разряда, интенсивности обработки и износа электрода при обработке стальной заготовки

На рисунке 1.2 показано соотношение шероховатости поверхностей, обрабатываемых электродом, от зазора энергии разряда. Обычно при увеличении разряда возрастает шероховатость и увеличивается зазор. Выбирая энергию разряда, можно получить требуемую шероховатость. Меняя энергию разряда, необходимо подобрать оптимальное отношение скорости обработки и износ электрода. Энергия разряда зависит от импульса: чем короче импульс, тем шероховатость меньше, а чем больше импульса, тем шероховатость больше.

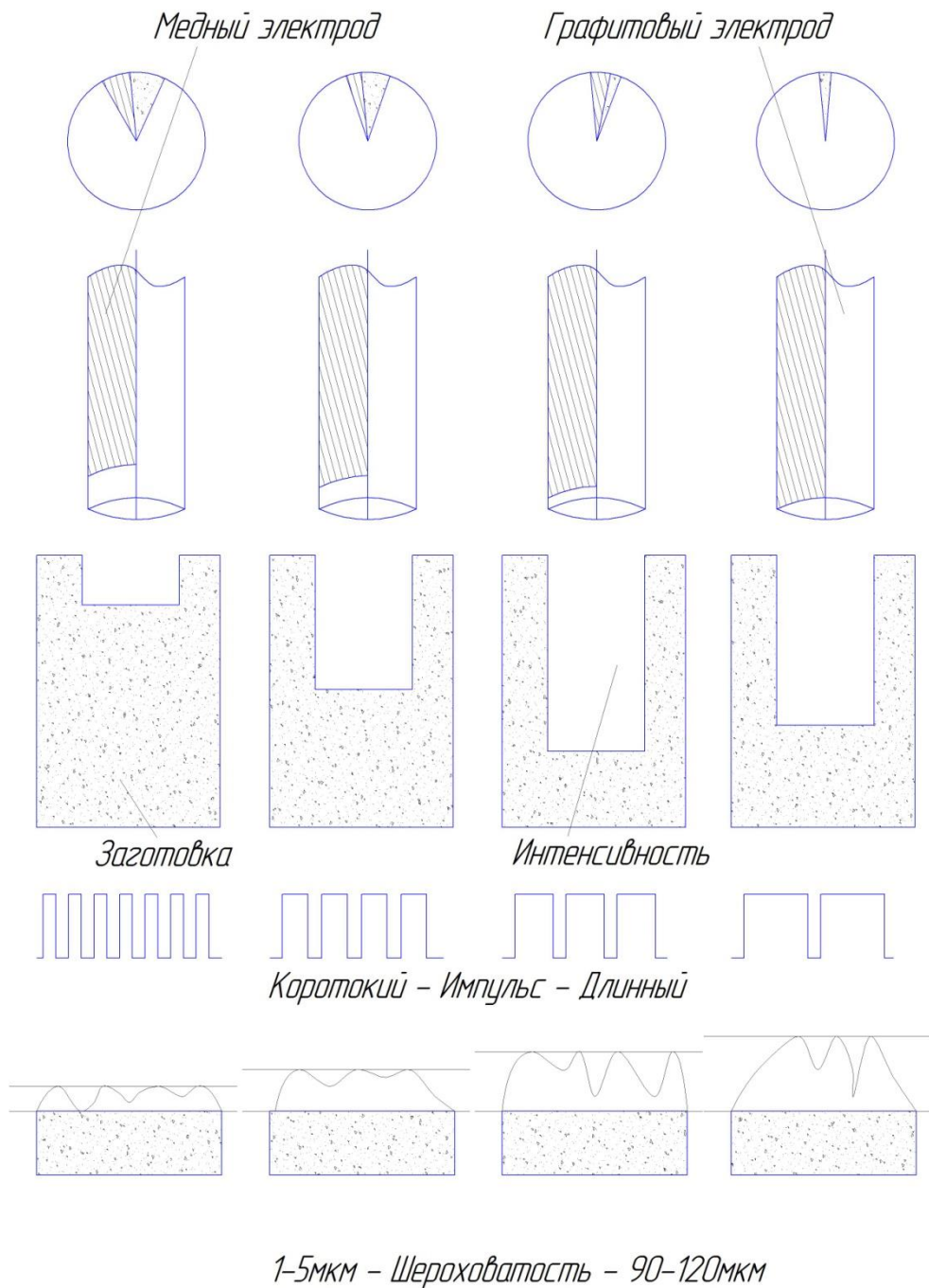


Рисунок 1.2 – Соотношение шероховатости обрабатываемых поверхностей и зазора энергии разряда

На рисунке 1.3 показано соотношение интенсивности обработки, износа электрода и промыва от времени между импульсами. Обычно при увеличении времени между импульсами необходимо учитывать материал заготовки. При прочих равных условиях производительность обработки повышается пропорционально уменьшению времени между импульсами.



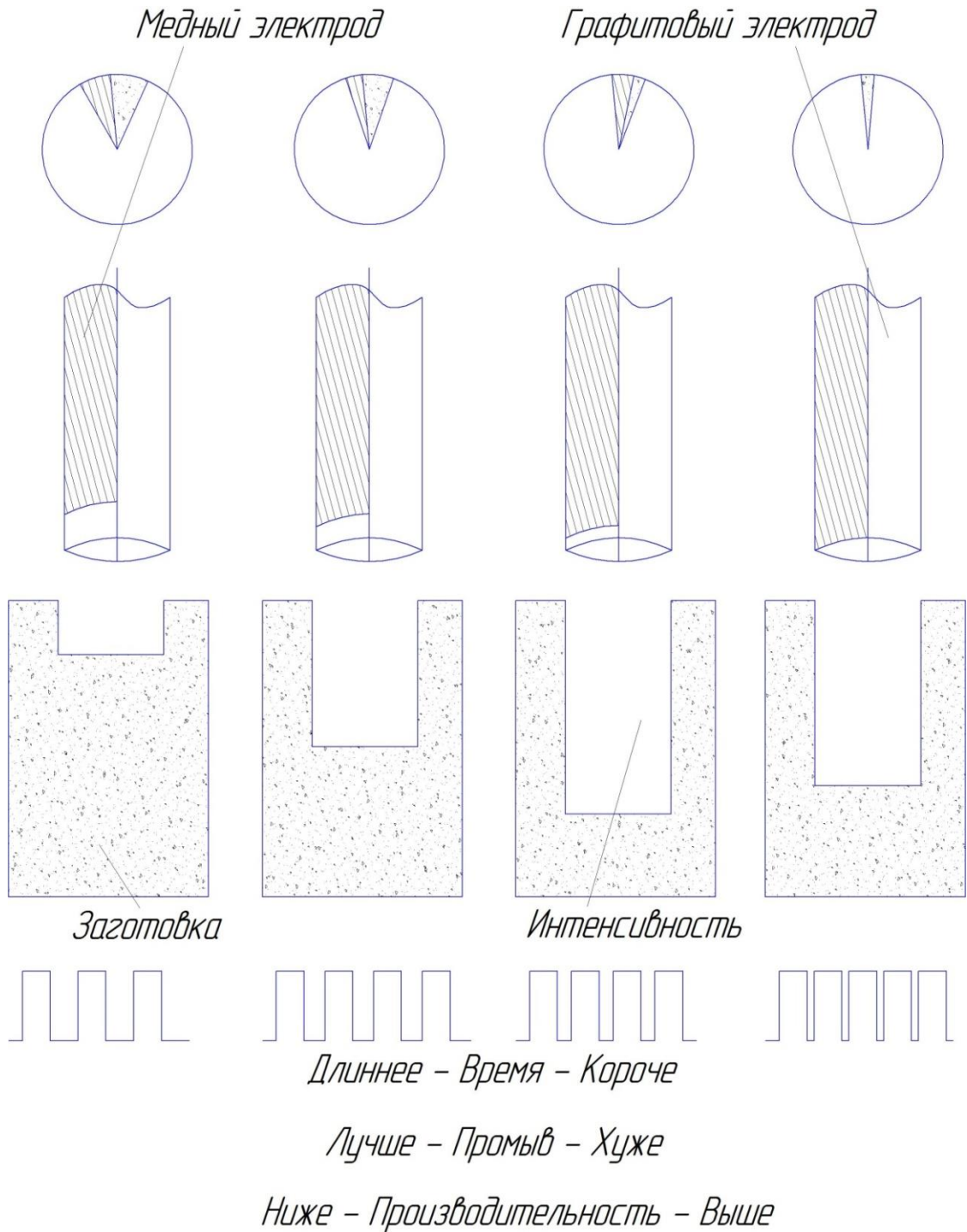


Рисунок 1.3 – Соотношение интенсивности обработки, износа электрода и промыва от времени между импульсами

Сложность в назначении параметров электроэрозионной обработки и изготовлении электрода-инструмента, а также его дороговизна ограничивают применение электроэрозионной обработки в производстве сложной формообразующей оснастки.

При эксплуатации пресс-форм неизбежен износ формообразующих поверхностей, ремонт и замена изношенных частей и деталей пресс-форм, в частности формообразующих деталей, является дорогим и трудоемким процессом. В настоящее время стоимость одной пресс-формы может варьироваться от 1 до 10 млн рублей в зависимости от габаритных размеров и сложности изготавливаемой детали, а стоимость ремонта вследствие износа может достигать до 70 % от стоимости самой пресс-формы (таблица 1.6).

Таблица 1.6 – Стоимость изготовления пресс-форм и ремонта формообразующих деталей в зависимости от габаритных размеров

Габаритный размер пресс-формы, мм	Стоимость изготовления пресс-формы, тыс. руб.	Стоимость ремонта формообразующих деталей, тыс. руб.
200x200	600 – 1000	300 – 700
400x400	800 – 1600	500 – 1000
500x500	1000 – 3000	600 – 2000
600x600	3000 – 6000	1000 – 4000
800x800	5000 – 8000	3000 – 7000
1000x1000	6000 – 10 000	4000 – 8000

В зависимости от размеров изготавливаемого изделия из ПКМ, количества гнезд в пресс-форме, сложности формообразующих поверхностей и конструкции пресс-формы стоимость может различаться. Производство таких сложных прецизионных деталей пресс-форм связано с использованием дорогостоящего оборудования и инструмента, а технологический процесс сложен и растянут во времени, что в итоге сказывается на себестоимости конечного изделия.

Приоритетным методом обработки для пресс-форм является фрезерование на станках с ЧПУ вследствие того, что при таком методе механической обработки снижается время технологического процесса за счет уменьшения переустановов и сокращения времени на смену инструмента, а также можно получить поверхность

необходимого качества и точности без использования дополнительного инструмента. При использовании фрезерования на станках с ЧПУ в технологическом процессе требуется меньше трудозатрат, что в совокупности влияет на себестоимость изготовления литьевых пресс-форм.

### **1.3 Анализ литературы по разработке методов управления фрезерованием на станках с ЧПУ для повышения качества формообразующих поверхностей пресс-форм**

Существует множество способов, как обеспечить требования, предъявляемые к формообразующим деталям пресс-форм, при использовании методов управления фрезерованием на станках с ЧПУ, увеличить скорость обработки и повысить качество обрабатываемой поверхности. В настоящее время при обработке резанием особое внимание уделяют режимам резания, а именно оптимально подобранной скорости резания, подаче и глубине резания. Также большое значение приобретает смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ). Правильно подобранная СОЖ поможет уменьшить износ инструмента, повысить качество обработанной поверхности и снизить затраты энергии. Также СОЖ влияет на образование наростов у режущей кромки инструмента [19; 98; 136].

Анализ сталей, применяющихся при изготовлении пресс-форм, показал, что наиболее часто для формообразующих деталей пресс-форм применяются легированные и коррозионно-стойкие жаропрочные стали. Для увеличения скорости обработки и повышения качества обрабатываемой поверхности требуется определить оптимальные режимы резания и методы управления фрезерованием [28; 89; 103].

Рассмотрим жаропрочные сплавы и оптимальные значения режимов резания для них. В работе [92] автор С.Н. Лапач отмечает, что для чистовой обработки фрезами малого диаметра при глубине 1 мм, подача на зуб  $S_z$  должна быть в пределах от 0,01 до 0,03 мм/зуб со скоростью 12 м/мин, что позволит достичь максимальной точности с максимально возможным качеством поверхности, а при

глубине 2 мм, подача на зуб  $S_z$  должна быть в пределах от 0,07 до 0,09 мм/зуб со скоростью 20 м/мин, что позволит достичь максимально возможной производительности.

Руководитель российского отдела технической поддержки Sandvik Coromant М.П. Беляев считает, что самой производительной является технология обработки сплавов круглыми керамическими пластинами. Удастся достичь скоростей резания 800–1000 м/мин при подачах на зуб 0,07–0,12 мм [63].

Все авторы изученных источников сходятся на том, что более эффективным является одновременная подача СОЖ в зону резания и в область образования стружки. При непрерывной подаче СОЖ можно избежать образования трещин в пластинах твердого сплава, тем самым продлив время работы инструмента при обработке на станках с ЧПУ.

Фирмы производители, такие как Sandvik Coromant, Widia, Mitsubishi и Iscar [58; 59; 60; 61; 62; 63; 64; 65] описывают концевые цельно-твердосплавные фрезы диаметром от 2 до 12 мм. При подаче 0,035 мм/зуб, глубине резания 4 мм, скорости резания 200 м/мин и ширине резания от 2 до 4 мм достигается высокая производительность с одновременно высокой стойкостью инструмента. Фирмы производители проводят исследования и разрабатывают новые покрытия для обработки сплавов, которые защищают твердый сплав от абразивного износа, а также служат тепловым барьером, чтобы тепло не дошло до самого твердого сплава при обработке. Само покрытие, как правило, имеет очень гладкую поверхность, поэтому стружка скользит по поверхности, не нанося ей какого-либо вреда, примечательно, что такое покрытие подходит для всех типов обрабатываемых материалов. Производители режущего инструмента рекомендуют использовать пластины и монолитный инструмент различных наименований с позитивной геометрией и острой режущей кромкой. В таком случае снижается усилие резания, теплообразование и наблюдается хорошее стружкодробление во время фрезерования [58; 61].

При проведении анализа литературных источников, которые представлены выше, выявлены значения режимов резания, применяемые для сплавов при

изготовлении пресс-форм, которые сведены в таблицу 1.7. Видно, что значения разнятся и находятся в большом диапазоне, что подтверждает необходимость проведения экспериментальных исследований по определению рациональных режимов резания.

Таблица 1.7 – Рекомендованные режимы фрезерования при изготовлении пресс-форм

Вид обработки	Параметры	Значение параметров
Фрезерование	Скорость м/мин	30...250
	Подача, мм/зуб	0,05...0,3
	Глубина, мм	0,1...1

На основании литературного анализа выделим некоторые особенности процесса фрезерования для повышения производительности и обеспечения качества обработки криволинейных поверхностей деталей пресс-форм в зависимости от типа обработки, который можно применить для обработки формообразующих поверхностей деталей пресс-форм (таблица 1.8). Основными типами обработки, применяемыми при изготовлении деталей пресс-форм, являются торцевое, периферийное, профильное, тяжелое фрезерование, при данных типах обработки существует возможность достижения требуемой геометрии поверхности путем задания оптимальных режимов резания. Основной проблемой при назначении оптимальных режимов резания является неравномерный припуск после черновой операции фрезерования, ступенчатый припуск при предварительном фрезеровании криволинейных поверхностей либо припуск после контурного фрезерования на универсальных станках черновыми фрезами углов и углублений.

Для решения этих проблем и исключения трудоемких операций технологии доработки припуска в углах и углублениях разработан метод доработки углов, цикл маятникового фрезерования и цикл многопроходного контурного фрезерования [30].

Таблица 1.8 - Особенности процесса фрезерования при различных типах обработки

Тип обработки	Характер обработки
Торцевое фрезерование	При обработке керамическим инструментом скорость резания может превышать 1000 м/мин, что, соответственно, означает очень высокую подачу. Фрезерование на таких режимах можно назвать высокоскоростной обработкой (HSM). Фрезы с небольшим углом в плане позволяют существенно увеличивать подачу. Это объясняется эффектом утонения стружки при небольшом значении глубины резания
Периферийное фрезерование	Когда фрезерный инструмент работает с небольшим припуском, время контакта инструмента с заготовкой мало, режущая кромка нагревается несильно. Соответственно, скорость резания и значение подачи может быть увеличено, так как максимальная толщина стружки в этом случае будет небольшой. Подача будет ограничена лишь требованиями по качеству обработанной поверхности
Профильное фрезерование	Данный метод фрезерования также называют высокоскоростной обработкой (HSM) на финишных этапах обработки формообразующих поверхностей фрезами со сферическим концом
Тяжёлое фрезерование	Для тяжёлого фрезерования используются фрезы большого диаметра с пластинами большого размера. При стандартном значении скорости резания высокая производительность достигается за счет больших значений глубины и подачи в сочетании с большой шириной фрезерования

Теоретическими основами поиска эффективных методов управления точностью при фрезеровании на станках с ЧПУ для повышения качества формообразующих поверхностей занимались В.С. Мендельсон, М.М. Палей и др. [104; 105; 112]. Авторами работ по методам управления точностью при

производстве формообразующей оснастки сделаны выводы, что для повышения качества обрабатываемой поверхности необходимо влиять на технологический процесс при изготовлении формообразующих деталей [8; 12; 13; 14; 15; 17; 29; 33; 46; 88; 93; 123].

Под параметрами качества обработанной поверхности понимается состояние поверхностного слоя. Состояние поверхностного слоя и микрорельеф, получаемый после операции фрезерования, зависят от свойств обрабатываемого материала, режимов обработки, жёсткости технологической системы и геометрических параметров инструмента, а также вида и способа подачи СОТС. Рассмотренные методы управления фрезерованием влияют на значение шероховатости и отклонение от формируемой геометрии обработки. В работах многих исследователей достаточно полно изучены влияние погрешности обработки и поиск путей уменьшения погрешности, а также повышение точности размеров и геометрии формообразующих поверхностей [3; 10; 45; 124; 140].

Однако вопросам повышения качества поверхности при операции фрезерования уделено мало внимания. В работах [30; 70; 71; 72; 73; 74; 75; 76; 77; 78; 79; 81; 82; 83; 109; 134; 153] описаны методы формирования специальной траектории обработки, положительно влияющей на качество обрабатываемой поверхности. Также повышением качества поверхностей методом формирования траектории фрезерования занимался А.В. Пепельшев под руководством профессора В.Ф. Макарова, им разработан способ, позволяющий заменить ручные операции и повысить качество обрабатываемой поверхности и производительность растрового фрезерования путем формирования шероховатости за счёт самопересечения траектории движения инструмента во время фрезерных операций [95; 96].

Проблемы прогнозирования шероховатости при фрезеровании широко рассматривались зарубежными учеными. Для концевое фрезерование разработаны модели прогнозирования с помощью анализа поверхности отклика, что дало возможность идентифицировать черновую и чистовую обработку и позволило назначать различные режимы резания [155; 156].

При торцевом фрезеровании, учитывая геометрические характеристики инструмента, а также биение отдельных частей сборных фрез, установлено, что осевые и радиальные биения инструмента провоцируют погрешность самих пластин [157].

При обработке фрезерованием криволинейных поверхностей на станках с ЧПУ проанализировано качество получаемой поверхности в зависимости от подачи [158].

При обработке фрезерованием плоских поверхностей разработана модель нейронной сети, применение которой позволяет получать требуемое качество поверхности в зависимости от назначаемых режимов резания [159]. Использование в машиностроении нейронных сетей позволило расширить возможности контроля режимов резания в процессе обработки на станках с ЧПУ. Нейронные сети позволяют определять шероховатость по построенным моделям и полученным алгоритмам [167].

Прогнозирование шероховатости с помощью нейронных сетей и искусственного интеллекта позволяет оценить влияние характеристик станка на получаемые характеристики обрабатываемой поверхности [168].

Аналитическая замена силы резания ускорением при высокоскоростном фрезеровании позволила получить данные о том, что вибрация инструмента при обработке отрицательно влияет на точность получаемой при фрезеровании поверхности. При таком подходе возможно прогнозирование шероховатости в процессе обработки [173].

Применение описанных эффективных методов управления фрезерованием на станках с ЧПУ, следование изложенным рекомендациям и принятию технологом рациональных технологических решений, исследование влияния множества факторов позволяют получить результаты экспериментальных исследований и сделать выводы о влиянии каждого фактора в отдельности, однако совокупное влияние исследуемых факторов не дает возможности в нужной степени обеспечить требуемое качество формообразующих поверхностей пресс-форм, и решение такой задачи требует более глубокого изучения влияния совокупности факторов на



процесс фрезерования или применения качественного нового подхода к решению таких задач.

#### **1.4 Анализ литературы по разработке методов повышения износостойкости и долговечности формообразующих поверхностей пресс-форм**

Важной проблемой во время эксплуатации формообразующей оснастки является малое количество времени безотказной наработки, недостаточный установленный ресурс и высокое количество плановых и капитальных ремонтов [32]. Таким образом, выявляется проблема низкой стойкости формообразующей оснастки, однако в современном машиностроении эта проблема имеет множество решений. Условия износа формообразующей оснастки, происходящие за счет трения формообразующих деталей, зависят от прилагаемой нагрузки на ответственные поверхности, от используемого материала, из которого изготавливаются формообразующие детали, и от их физико-механических свойств. Прилагаемая нагрузка на формообразующие поверхности определена технологией и условиями производства, а изменение материала, применяемого для изготовления формообразующих деталей, позволяет в некоторой степени влиять на износостойкость формообразующих деталей. В то же время повышение стойкости рабочих частей штампов путем замены инструментальных сталей на быстрорежущие или твердые сплавы, а также за счет сложного легирования инструментальных сталей весьма ограничено из-за дефицита вольфрама, молибдена, тантала и других составляющих элементов [57].

В публикациях, посвященных проблеме повышения износостойкости, отмечается, что с целью повышения твердости поверхности вырубных штампов и другой технологической оснастки, уменьшения коэффициента трения между инструментом и обрабатываемым изделием, формирования на рабочих частях защитного слоя, противодействующего образованию задиров и налипания обрабатываемого материала, уменьшения параметров шероховатости рабочих поверхностей используют финишное

плазменное упрочнение, ионно-плазменные покрытия или химико-термическую обработку (ХТО) [127; 148; 154]. Часто повышение ресурса достигается за счет нанесения различных покрытий, таким образом, в работе [139] представлены результаты производственных испытаний штампов, они подтверждают эффективность использования тонкопленочного покрытия, которое наносится путем финишного плазменного упрочнения. Также эффективным методом повышения стойкости формообразующих деталей является метод нанесения карбидных и карбонитридных покрытий ионно-плазменным методом [117]. Разработанные технологические процессы значительно повышают стойкость и позволяют заменить высоколегированные стали на низколегированные.

В свою очередь в работе [118] предлагается метод нанесения антифрикционных покрытий с предварительной термической обработкой, что значительно повышает износостойкость штампов, так как такой способ позволяет предотвратить такие основные причины снижения стойкости, как возникновение усталостных трещин и наклеп поверхностного слоя. Также снизить вероятность появления усталостных трещин и наклепа поверхностного слоя возможно с помощью поверхностно пластического деформирования за счет применения способа снижающего усилия во время операции штамповки, как это описано в работе [26].

Все более распространенным механизмом упрочнения формообразующих деталей является способ воздействия на них концентрированными источниками энергии или электрической дугой. Под электрической дугой понимается поток энергии, локально действующий на участок поверхности. Упрочнение таким способом можно разделить на несколько методов:

1. Высокоскоростной нагрев до температур, не превышающих температуры фазового превращения.
2. Поверхностная закалка с получением метастабильного фазового состояния с последующим старением и отпуском.

3. Нагрев до температур, превышающих температуры плавления с ускоренной кристаллизацией, с достижением мелкодисперсной структуры материала.

4. Поверхностное легирование путем диффузионного взаимодействия легирующих компонентов.

Такие методы значительно повышают качество, снижают износ формообразующей поверхности и описаны в работах [67; 116; 143; 127; 148; 154].

Интенсивный износ пресс-формы происходит прежде всего на формообразующих поверхностях, которые подвергаются агрессивному воздействию высоких температур при технологическом цикле литья и абразивному изнашиванию при движении армированного волокном расплава из ПКМ, имеющего различные наполнители в виде стекла или графита. Применение некоторых методов повышения износостойкости литейных пресс-форм и другой формообразующей оснастки, например, различные виды химико-термической обработки, использование смазочных материалов при эксплуатации оснастки, использование защитных покрытий, поверхностное упрочнение вследствие применения лазерной, ультразвуковой и плазменной обработки может обеспечить некоторое увеличение длительности их работы [4; 7; 20; 25; 51; 52; 110; 114; 120; 135; 137; 142; 149; 150; 154], но для возможности применения описанных методов часто требуется дорогостоящее оборудование и инструмент, специальные установки и технологии. Методов, позволяющих достичь высокой стойкости формообразующей оснастки без использования дорогостоящего оборудования, практически нет. В работах [160; 161; 162; 171] описаны результаты экспериментальных исследований влияния стратегии фрезерования на долговечность формообразующей оснастки и применяемые стратегии фрезерования для оптимизации обработки на станках с ЧПУ.

Рассмотренные методы не обеспечивают повышения износостойкости формообразующей оснастки, в частности пресс-форм и отдельных формообразующих деталей, в полной мере. Результаты литературного анализа

увеличения ресурса формообразующей оснастки, штампов и пресс-форм в зависимости от метода повышения износостойкости сведены в таблицу 1.9.

Таблица 1.9 – Увеличение ресурса пресс-форм в зависимости от метода повышения износостойкости

Метод повышения износостойкости	Результат применения метода при эксплуатации оснастки
Финишное плазменное упрочнение	30–50 %
Ионно-плазменные покрытия	30–45 %
Применение антифрикционных покрытий	25–30 %
ППД	15–30 %
Упрочнение электрической дугой	20–40 %
ХТО	15–40 %

Методы повышения износостойкости формообразующих поверхностей пресс-форм мало изучены, описанные результаты методов применяемых при изготовлении штампов, часто невозможно использовать для пресс-форм, предназначенных для литья под давлением изделий из ПКМ. Анализ работ отечественных и зарубежных авторов по увеличению износостойкости деталей сложной геометрической оснастки показал, что практически отсутствуют теоретические и практические исследования по влиянию траектории обработки и рельефа формообразующих поверхностей на повышение долговечности и производительности пресс-форм с одновременным снижением себестоимости и повышением качества конечного изделия – отлитой детали.

### **1.5 Анализ производственного опыта повышения износостойкости и показателей качества при изготовлении деталей пресс-форм**

В современных условиях развития технологий обработки деталей со сложной криволинейной поверхностью производители пресс-форм стремятся внедрять

методы, позволяющие достигнуть максимального экономического эффекта. Обеспечение лучшей шероховатости и сокращение цикла изготовления изделия достижимо при использовании современного оборудования, которое позволяет применить новейший обрабатывающий инструмент и рекомендованные производителями режимы резания. Наиболее распространенным способом повышения производительности и качества обрабатываемых деталей на предприятиях является высокоскоростное фрезерование. Такой способ обработки может значительно сократить цикл изготовления пресс-форм и эффективно обрабатывать материалы твердостью более 55 HRC за счет фрезерования специальными фрезами, предназначенными для высоких подач и скоростей резания, а также обеспечить высокое качество поверхности [21; 115]. Такие российские предприятия производители пресс-форм, как завод штампов и пресс-форм «Группы ГАЗ», Кропотинский завод МиССП, ООО «Аверс», ООО «ИЖРЭСТ», ООО «ПК Дэми», ООО «Ульяновский приборо-ремонтный завод» и др., используют передовые высокоэффективные технологии формирования стратегий фрезерования, программирования управляющих программ и оптимизации условий обработки пресс-форм для обеспечения минимальной себестоимости и повышения конкурентоспособности.

Важную роль в цикле изготовления пресс-форм играют скорость и качество принимаемых решений на этапе конструкторской и технологической работы [125; 128]. Для уменьшения периода разработки изделий из ПКМ и увеличения качества обрабатываемых поверхностей деталей пресс-форм используются автоматизированные системы для комплексного решения проблемы проектирования изделия и пресс-формы, моделирования процесса технологического цикла литья и составление управляющей программы для обработки на станках с ЧПУ [1; 128]. Под это описание подходят (PLM) системы для управления жизненным циклом изготавливаемой продукции. Наиболее часто на предприятиях используются такие системы автоматизированного проектирования (CAD), автоматизированные системы подготовки управляющих программ (CAM), системы инженерного анализа (CAE), как SolidWorks и

Unigraphics NX [174; 27; 170; 138]. Однако совершенно не исследовано влияние результатов математического моделирования процессов заполнения пресс-форм в CAD/CAM/CAE-системах на процесс фрезерования и формирования макрорельефа формообразующих пресс-форм.

Опыт предприятий показывает, что в погоне за повышением износостойкости формообразующих деталей пресс-формы зачастую меняют материал изготавливаемых деталей из ПКМ. Такое решение напрямую отражается на показателях качества отливаемой детали, влечет за собой изменение физико-механических характеристик и эксплуатационной стойкости. Таким образом, при повышении износостойкости формообразующих деталей снижается время эксплуатации самой детали из ПКМ, что недопустимо в условиях современного машиностроения. При производстве пресс-форм многие производители меняют назначенный конструктором материал для изготовления пресс-форм либо используют неподходящий инструмент в целях обеспечения более низкой себестоимости пресс-формы, в таком случае детали из ПКМ, отливаемые в пресс-формах, не соответствуют требуемому качеству, а стойкость пресс-форм значительно снижается. В производственных условиях на существующем оборудовании достижение высокой износостойкости и высокого качества обрабатываемой формообразующей поверхности сопряжено с высокими материальными затратами. В условиях ограниченных ресурсов и невозможности приобретения необходимого высокопроизводительного современного оборудования предприятия вынуждены закупать современный инструмент и использовать передовые методы управления фрезерованием и назначать оптимальные режимы резания.

Однако методам управления траекторией фрезерования во время обработки формообразующих поверхностей не уделено должного внимания. Современные модули автоматизированных систем (САМ), предназначенные для подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ, и программное обеспечение для программирования фрезерного инструмента обеспечивают возможность воспроизведения различных траекторий инструмента. Характеристика формы

траектории инструмента описывается термином – стратегия фрезерования. При фрезеровании на универсальных станках стратегия не имеет значения, потому что в большинстве случаев это очень простые траектории, которые зависят от кинематики оборудования. В наши дни существует множество различных станков с ЧПУ, которые в совокупности с управляющей программой дают широкие возможности перемещения инструмента в рабочем пространстве.

Необходимо найти такую технологию управления фрезерованием на станках с ЧПУ, которая будет повышать качество обрабатываемых формообразующих поверхностей пресс-форм. Технология должна учитывать такие выявленные характеристики, как параметры детали и ее геометрические особенности, применяемое оборудование, режущий инструмент, режимы резания и параметры качества обрабатываемой поверхности, представленные в таблице 1.10.

Таблица 1.10 – Характеристики для разработки метода управления фрезерованием для повышения качества путем формирования рационального макрорельефа

Параметры детали	Оборудование	Режущий инструмент	Режимы резания	Параметры поверхности
<ul style="list-style-type: none"> <li>●Материал</li> <li>●Минимальный радиус обработки</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●Жесткость</li> <li>●Максимальные параметры резания</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●Диаметр</li> <li>●Тип инструмента</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●Скорость</li> <li>●Подача</li> <li>●Глубина</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●Шероховатость</li> <li>●Отклонение от геометрии</li> <li>●Макрорельеф</li> </ul>

Данные параметры в своем сочетании должны стремиться обеспечить максимальную производительность и качество обрабатываемой формообразующей поверхности, для этого необходимо проводить собственные теоретические и экспериментальные исследования процессов фрезерования для каждого конкретного случая, так как в совокупности факторы, влияющие на процесс фрезерования, для каждого предприятия уникальны: различное применяемое оборудование, инструмент различного качества, нехватка технического персонала

достаточной квалификации не могут обеспечить результаты, показываемые при экспериментальных исследованиях в работах ученых.

Предприятия-изготовители формообразующей оснастки сталкиваются также с проблемами в области тендерных закупок. Выставляя заявку на изготовление формообразующей оснастки, исполнитель чаще всего не представляет, каким образом обеспечить предъявляемые требования к изделию, также, выигрывая тендер по минимальной цене, исполнитель вынужден снижать стоимость всеми возможными путями, что приводит к снижению качества формообразующей оснастки в виде пресс-форм, а значит и к снижению качества конечных изделий. Впоследствии это влечет за собой изготовление бракованной продукции, а также переделку или капитальный ремонт формообразующей оснастки, что сказывается на себестоимости и конкурентоспособности предприятий-производителей на международном рынке.

В настоящее время в условиях ограничения поставок необходимого оборудования, инструмента и технологических решений необходимо найти технологию, которая будет влиять на качество формообразующих поверхностей пресс-форм, повышая износостойкость формообразующей оснастки не зависимо от использованного инструмента и оборудования, опираясь преимущественно на технологию фрезерования.

## **1.6 Анализ литературы по исследованию механизма движения вязкотекучих материалов в закрытых полостях с различной шероховатостью поверхностей**

На сегодняшний день во многих сферах машиностроения применяется метод литья из ПКМ в пресс-формы, однако исследованию механизмов движения вязкотекучих материалов с наличием армирующего волокна в закрытых полостях с различной шероховатостью формообразующих поверхностей уделено мало влияния. Понимание механизма движения вязкотекучего материала внутри литьевых пресс-форм по закрытым полостям может помочь в разработке методов влияния на этот процесс при фрезеровании на станках с ЧПУ. В работе [69]



рассматривается новый метод литья под давлением для определения параметров технологического цикла литья изделий из ПКМ и определения возможности оптимизации движения полимерной массы в закрытой полости для создания условий, способствующих влиянию на ориентацию армирующего волокна. Результаты исследования для двух противоположных по результатам режимов показаны на рисунке 1.4.

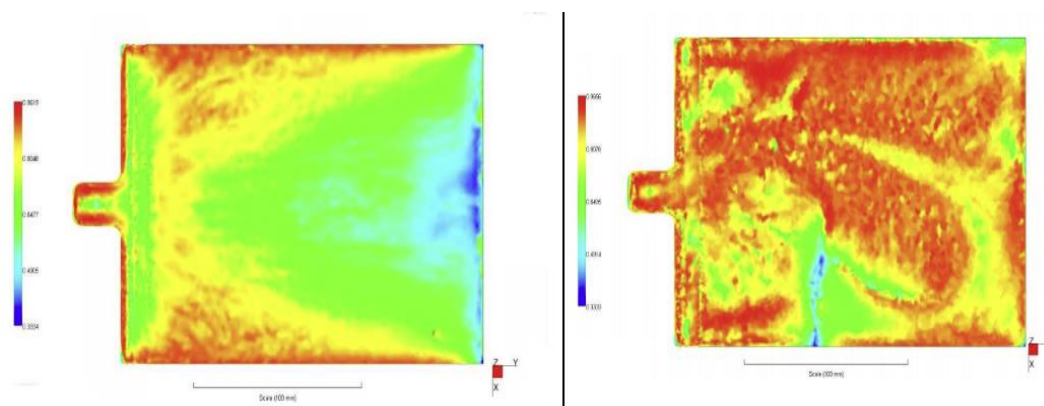


Рисунок 1.4 – Результат оптимизации ориентации армирующего волокна в САЕ-системе

Исследование проведено в САЕ-системе, использование таких программных продуктов позволяет оценить ориентацию армирующего волокна внутри закрытой полости, в которой происходит движение полимерной массы. В работе показана методика оценки физико-механических параметров получаемой детали с помощью данных, полученных в результате моделирования.

Процесс заполнения вязкотекучих материалов является одним из приоритетных направлений исследований. Воздействие на процесс заполнения в закрытых полостях влияет на конструкционные характеристики изготавливаемых деталей из ПКМ. В работе [133] исследован процесс заполнения статорной лопатки компрессора ПКМ. Изложено, что в общем виде процесс заполнения пресс-формы описывается численными методами конечных элементов с помощью уравнения Навье – Стокса, которое в свою очередь состоит из двух уравнений, одно из которых уравнение движения, а второе уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{\nabla p}{\rho} + f; \quad (1.1)$$

$$\nabla \vec{v} = 0, \quad (1.2)$$

где  $\nabla$  – оператор набла;

$\Delta$  – оператор Лапласа;

$p$  – давление;

$\vec{v}$  – векторное поле скоростей;

$t$  – время;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости;

$\rho$  – плотность;

$f$  – векторное поле массовых сил.

Функциями времени в этом уравнении являются скорость и давление, которые рассматриваются либо в двумерном, либо в трехмерном пространстве. По известной модели Кросса – Вильямса – Ландела – Ферри определяют вязкость. Модель описывает функцию вязкости, зависящую от давления, температуры и скорости сдвига:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}}, \quad (1.3)$$

где  $\eta$  – вязкость расплава (Па\*с);

$\dot{\gamma}$  – скорость сдвига (1/с);

$\eta_0$  – вязкость при нулевом сдвиге;

$\tau^*$  – критический уровень напряжения в начале сдвиговой деформации.

При нулевом сдвиге вязкость описывается уравнением:

$$\eta_0 = D_1 \exp \left[ -\frac{A_1(T-T^*)}{A_2 + (T-T^*)} \right], \quad (1.4)$$

где  $T$  – температура;

$A_2$  – коэффициент равный  $A_3 + D_3 p$ ;

$D_1, D_2, A_1, A_3, D_3$  – коэффициенты, полученные из экспериментальных данных;

$T^*$  – температура стеклования равная  $D_2 + D_3 p$ ;

$p$  – давление.

В процессе работы были определены режимы, обеспечивающие полное заполнение и желаемую ориентацию волокна. С помощью CAE-моделирования было выявлено, что требуемая ориентация в наибольшей степени зависит от скорости впрыска расплава. Однако представленные уравнения не учитывают шероховатость формообразующих поверхностей пресс-формы и ее влияние на процесс заполнения пресс-формы.

Метод литья под давлением позволяет получать качественные и бездефектные изделия из ПКМ, это обусловлено структурно-механическими свойствами полимерных материалов. Для формирования научно обусловленных требований к технологическому процессу заполнения вязкотекучими материалами пресс-форм необходимо изучение реологических характеристик полимерных материалов.

В работе [85] рассмотрено поведение движения полимерной массы и установлены параметры, влияющие на технологический процесс цикла литья. Исследовано заполнение закрытых полостей пресс-форм, по которым движется расплав. Показано, что для вязких полимерных композиций для описания подходит модель З.П. Шульмана. Гидродинамическое поведение полимерной массы сопоставлено с реологической моделью и с помощью математического моделирования подтверждено соответствие. Рассмотрены процессы заполнения круглой трубы и канала в пресс-форме и выявлены особенности гидродинамического поведения вязкой полимерной массы.

Процесс заполнения пресс-форм является многофакторным, и его исследование является приоритетной задачей при оптимизации технологического процесса литья. В работах [164; 169; 126] посредством моделирования процесса литья рассмотрены вопросы определения оптимального положения частей пресс-формы в виде литниковых каналов. Между литейными параметрами пресс-формы, такими как давление, температура в пресс-форме, температура расплава и время охлаждения выявлена взаимосвязь с усадкой, которая получается на готовом изделии из полимеров в результате работы пресс-формы.

## 1.7 Выводы по первой главе. Цель работы и задачи исследований

Анализ литературных данных и производственного опыта показал:

1. Для изделий машиностроения широко используются детали из ПКМ, изготавливаемые методом литья под давлением в пресс-формы.

2. Методы повышения износостойкости характеризуются низкими технико-экономическими показателями, так как при изготовлении формообразующих деталей пресс-форм используется дорогостоящее оборудование, инструмент и труднообрабатываемые стали, что обеспечивает значительное повышение себестоимости конечного изделия.

3. Не исследовано влияние результатов математического моделирования процессов заполнения пресс-форм в CAD/CAM/CAE-системах на процесс фрезерования и формирования макрорельефа формообразующих пресс-форм.

4. Слабо изучено влияние высоты и направления макрорельефа на формообразующих поверхностях, который формируется при фрезеровании на станках с ЧПУ, на качество и износостойкость пресс-форм;

5. Отсутствуют технологические рекомендации и алгоритмы по определению рациональной траектории фрезерования для повышения износостойкости формообразующих поверхностей пресс-форм.

Опыт изготовления формообразующих деталей пресс-форм пространственно-сложной криволинейной формы на предприятиях позволяет сделать вывод, что при обработке по серийным технологиям фрезерования не обеспечивается необходимая величина безотказной наработки и установленный ресурс, имеет место большое количество плановых и капитальных ремонтов. Обзор литературных источников и опыта предприятий показал, что необходимо найти такой метод управления фрезерованием на станках с ЧПУ, который будет повышать качество формообразующих поверхностей пресс-форм путем выбора формирования рационального макрорельефа, обеспечивая при этом высокие технико-экономические показатели и не будет требовать использования в технологии дорогостоящего оборудования и инструмента.

Требуется экспериментальным путем определить влияние траектории движения инструмента при фрезеровании на станках с ЧПУ и полученного рельефа на интенсивность изнашивания формообразующих поверхностей в процессе формирования изделия из ПКМ в пресс-формах, а также провести исследование влияния траектории движения инструмента и полученного направления макрорельефа на производительность процесса литья для деталей из пластмасс различного размера.

**Цель работы** заключается в технологическом обеспечении повышения износостойкости пресс-форм на основе формирования высоты и направления макрорельефа на формообразующих поверхностях путем программирования траектории обработки сферическими монолитными фрезами на станках с ЧПУ.

Для достижения этой цели поставлены следующие **задачи**:

1. Проанализировать причины повышенного износа формообразующих поверхностей пресс-форм из закаленных сталей, обосновать влияние параметров макрорельефа, формируемого при фрезеровании концевыми фрезами, на износостойкость и время заполнения различных полостей сложных пространственных пресс-форм.

2. На основе математического моделирования формирования макрорельефа при фрезеровании оценить его влияние на время заполнения полостей пресс-форм. Рассчитать и обосновать наиболее рациональную траекторию движения фрезы в зависимости от размеров и геометрических параметров деталей пресс-форм с целью формирования макрорельефа, обеспечивающего в результате наименьшие сопротивление потоку расплава, износ формообразующих поверхностей, равномерную скорость заполнения пресс-формы и остывания изделий.

3. Разработать методику проведения экспериментальных исследований по повышению износостойкости пресс-форм на основе формирования рационального макрорельефа на формообразующих поверхностях путем программирования траектории обработки сферическими монолитными фрезами на станках с ЧПУ.

4. Провести сравнительные экспериментальные исследования в лабораторных и производственных условиях по установлению влияния

направления и высоты макрорельефа, формируемого в результате траектории движения фрезы при фрезеровании, на величину износа формообразующих поверхностей в процессе изготовления деталей из композиционных материалов и время заполнения пресс-форм, изготовленных по серийной заводской технологии, и пресс-форм, изготовленных по новой технологии направленного формирования рационального макрорельефа.

5. Провести экспериментальные исследования и получить эмпирические математические модели зависимости величины макрорельефа, величины шероховатости обработанной поверхности, величины времени заполнения полостей пресс-форм от параметров формообразующих поверхностей и режимов резания.

6. Разработать универсальный алгоритм подготовки управляющих программ фрезерования для станков с ЧПУ с учетом обеспечения рационального макрорельефа на профильных формообразующих поверхностях пресс-форм по заданному направлению траектории фрезерования.

7. Разработать технологические рекомендации и внедрить в производство новую технологию направленного формирования рационального макрорельефа формообразующих поверхностей.

## **Глава 2. Теоретическое обоснование и моделирование влияния процесса формирования макрорельефа на формообразующих поверхностях по высоте и направлению на производительность, качество и износостойкость пресс-форм**

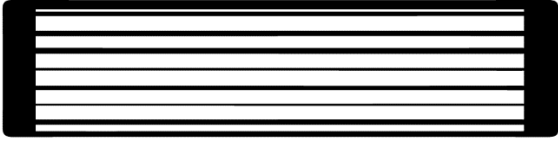

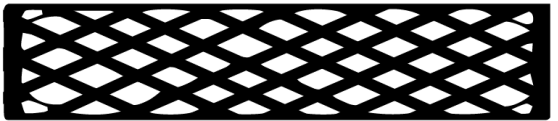
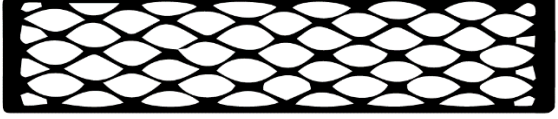
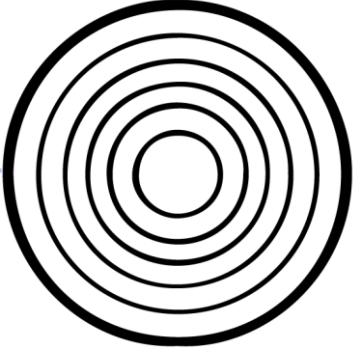
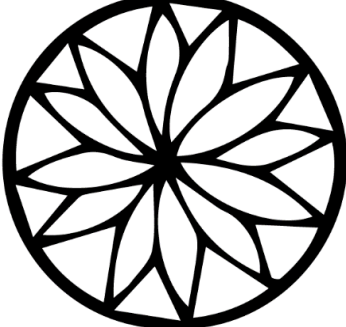
### **2.1 Теоретическое обоснование влияния макрорельефа на формообразующих поверхностях по высоте и направлению на качество и износостойкость обработанной поверхности методом профильного фрезерования концевыми сферическими фрезами**

Анализ существующих методов повышения износостойкости пресс-форм и методов обеспечения качества поверхностного слоя деталей сложной геометрической формы показал, что в настоящее время не учитывается влияние формируемого макрорельефа на формообразующих поверхностях на степень изнашиваемости формообразующей оснастки.

При любой механической обработке материалов на поверхности, сопрягаемой с обрабатывающим инструментом возникают неровности – макрорельеф. Причин возникновения неровностей множество: неравномерность прилагаемых усилий обрабатывающего инструмента, износ режущей кромки, неравномерность свойств обрабатываемого материала, деформации, возникающие в процессе механической лезвийной обработки в системе СПИД, неравномерность температуры в зоне резания и т.д. Микронеровности в виде выступов и впадин являют собой шероховатость поверхности с различным типом направлений неровностей по отношению к линии, изображающей на чертеже поверхность, к которой устанавливается шероховатость (таблица 2.1) [37; 42].

При интенсивной эксплуатации поверхностей в различных узлах машиностроительного назначения шероховатость может непосредственно влиять как на физико-механические свойства, так и на органолептические свойства изделий, такие как прочность, стойкость к износу, коррозионную стойкость и внешний вид.

Таблица 2.1 – Типы направлений неровностей

Типы направлений неровностей	Схематическое изображение
Параллельное	
Перпендикулярное	
Перекрещивающееся	
Произвольное	
Кругообразное	
Радиальное	

При перемещении друг относительно друга соприкасающихся поверхностей значительная часть энергии тратится на преодоление сил трения. В результате этого возникает нагрев трущихся элементов частей механизмов и происходит рассеивание потраченной энергии. Таким образом, снижается эффективность



передачи энергии в работе узлов машин и механизмов. Для повышения эффективности передачи энергии и уменьшения сил трения при движении требуется снижать величину шероховатости, одновременно повышая качество поверхности движущихся деталей.

При изменении величины шероховатости в сторону уменьшения при механической обработке возможно изменение структуры обрабатываемой поверхности. При фрезеровании возникают высокие температуры в зоне контакта инструмента и заготовки, при температуре более 800°С происходят структурные изменения обрабатываемого материала. Обработанная поверхность может иметь структуру, отличную от таковой в изначальной заготовке, что необходимо учитывать при назначении режимов обработки на станках с ЧПУ, особенно на финишных операциях, когда обработка может вестись инструментом малого диаметра для получения и формирования необходимой величины шероховатости.

Трение вследствие высокой величины шероховатости вызывает повышенный износ трущихся поверхностей. Часто в машиностроении применяются смазочные материалы, позволяющие частично избежать процесса трения, однако не всегда малая величина шероховатости способствует положительному результату. Высокое качество поверхности в различных узлах вращающихся элементов может привести к прилипанию поверхностей в результате высоконагруженной работы, в таких случаях наличие некоторой высоты шероховатости приводит к тому, что смазка, попадая во впадины, остается там и не выдавливается, создавая условия для работы при интенсивной эксплуатации.

В современном машиностроении большое внимание уделяют формированию шероховатости на ответственных деталях и поверхностях. Используемый обрабатывающий инструмент, обрабатываемый материал и применяющееся оборудование должны обеспечивать достижение предъявляемых требований по величине шероховатости.

При фрезеровании шероховатость обеспечивается благодаря технологическому процессу, в котором строго определены режимы резания, геометрические параметры обрабатывающего инструмента, назначен материал

обрабатываемой детали и инструмента, а также определено оборудование, на котором будет проводиться обработка. В производственных условиях для снижения величины шероховатости технологи занижают режимы фрезерования для снятия избыточной нагрузки на обрабатывающий инструмент и заготовку в процессе обработки. При таких режимах резания необходимо, чтобы инструмент не имел дефектов на режущей кромке.

Также на величину шероховатости влияет установленный обрабатываемый материал: для различных материалов требуется назначение подходящих режимов и использование различного инструмента как по геометрии, так и по химическому составу. Твердость обрабатываемого материала в процессе фрезерования непосредственно влияет на высоту шероховатости: чем тверже материал, тем более хрупкая стружка возникает в процессе обработки, при этом вследствие твердости материала при формировании стружки пластическая деформация происходит не только в зоне резания, но и на смежных поверхностях, тем самым вызывая увеличение шероховатости.

Необходимо строго следовать назначенным конструктором или технологом в чертежах величинам шероховатости, а также рекомендаций ГОСТ [86], так как нецелесообразно достигать низкой величины шероховатости на тех поверхностях на которых это не требуется, достижение низкой величины шероховатости всегда сопряжено с дороговизной применения в производственном процессе более дорогого инструмента и использования более дорогого оборудования для достижения избыточной величины шероховатости. Однако при фрезеровании и достижении требуемой шероховатости вследствие движения обрабатывающего инструмента по траектории фрезерования остается ребристость, появляющаяся из-за шага между строчками фрезерования. Ребристость – макрорельеф, получаемый во время операции фрезерования по различным стратегиям, может положительно влиять на параметры качества обрабатываемой поверхности.

На сегодняшний день применяемое оборудование с ЧПУ позволяет обеспечить предъявляемые требования к поверхности во время фрезерования. Особенно это справедливо для поверхностей, которые являются нерабочими или

невидимыми для глаз человека. Обработка поверхности пресс-форм может быть различной в зависимости от геометрических особенностей обрабатываемой детали и стратегии обработки. Касательно стратегий обработки поверхностей, наиболее часто предлагаемыми САМ-системами для фрезерования, мы различаем:

- линейное фрезерование,
- круговое фрезерование,
- трохоидальное фрезерование,
- обработка по Z-координате.

В большинстве случаев круговая обработка используется для фрезерования круглых, овальных, сферических форм. Плоские поверхности чаще обрабатывают линейными траекториями, которые могут быть ориентированы под разными углами или трохоидальным способом фрезерования. Обработка по Z-координате подходит для фрезерования плоскостей или криволинейных поверхностей. Существует возможность получить макрорельеф формообразующей поверхности пресс-формы, отвечающий необходимым требованиям качества, предъявляемым к обрабатываемой поверхности. Задача создать такой макрорельеф на формообразующей поверхности, чтобы он не препятствовал движению материала внутри пресс-формы. Это значит, что направление макрорельефа на формообразующей поверхности должно быть направлено по пути движения расплава в пресс-форме. Таким образом, траектория фрезерования, формирующая макрорельеф сонаправленная с движением потока позволяет ПКМ двигаться в пресс-форме без затруднений.

Выдвинута гипотеза, что при использовании новой технологии путем создания направленного рационального макрорельефа на формообразующих поверхностях при фрезеровании на станках с ЧПУ обеспечивается более высокое качество обработанной поверхности. Под более высоким качеством поверхностей пресс-форм подразумевается высокая эффективность технологического цикла литья, обеспечивающая наибольшую скорость заполнения пресс-форм и наименьший износ поверхности, увеличивая при этом износостойкость формообразующих поверхностей пресс-форм. Технология направленного

формообразования макрорельефа (ТНФМ) подразумевает выбор траектории обработки и формирования ребристости – макрорельефа необходимой высоты и направления относительно течения расплава в пресс-форме

## 2.2 Обоснование влияния макрорельефа формообразующих поверхностей на движение высоковязкой жидкости в закрытых полостях

Известно, что движение высоковязкой жидкости сопряжено с движениями внутри потока частиц по принципиально разным траекториям. Ламинарное, а также турбулентное движение открыто благодаря трудам Г. Хакена, Д.И. Менделеева и Осборна Рейнольдса. В ламинарном движении при малых скоростях потоки жидкости не перемешиваются, а в турбулентном движении частицы жидкости двигаются беспорядочно. Число Рейнольдса служит для определения режима движения жидкости, это безразмерная величина являющаяся отношением скорости к параметрам трения, возникающим в процессе движения – вязкости [141].

Число Рейнольдса для труб определяется по следующей формуле:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (2.1)$$

где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м<sup>2</sup>/с

$v$  – средняя скорость потока жидкости, м/с.

В случае, когда полостью является некруглое сечение, для расчета числа Рейнольдса используется гидравлический диаметр, являющий собой отношение площади поперечного сечения и смоченного периметра:

$$Re = \frac{v \cdot d_{\text{гидр}}}{\nu}, \quad d_{\text{гидр}} = \frac{4S}{\Pi}, \quad (2.2)$$

где  $\Pi$  – смоченный периметр, м;

$S$  – площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;

Режим движения возможно установить по значению числа Рейнольдса: определяют нижнюю критическую скорость  $v_{н.к.}$ , по которой назначают режим движения жидкости.

Режим движения жидкости в свою очередь позволяет оценить потери напора по длине потока. Потери напора по длине потока при ламинарном движении зависят от коэффициента при ламинарном движении жидкости и скорости потока и рассчитываются по формуле:

$$h_w = k_l \cdot v, \quad (2.3)$$

где  $k_l$  – коэффициент пропорциональности ламинарного режима движения жидкости;

$h_w$  – потери напора по длине потока, м;

Потери напора по длине потока при турбулентном движении зависят от коэффициента при турбулентном режиме движения жидкости и скорости потока, возведенной в степень в зависимости от интенсивности движения, и рассчитываются по формуле:

$$h_w = k_l \cdot v^n, \quad (2.4)$$

где  $k_l$  – коэффициент пропорциональности турбулентного режима движения жидкости;

$n$  – показатель степени, меняющийся от 1,75 до 2.

Основная часть движущейся массы при турбулентном режиме движения составляет соответствующее ядро, вблизи стенок рассматриваемых полостей возникает ламинарный и переходный слой.

Слой  $\delta$ , определяющий толщину ламинарного движения вблизи стенок полостей, определяется по формуле:

$$\delta = \frac{30 \cdot D}{\text{Re} \cdot \sqrt{\lambda}} = \frac{30 \cdot v}{v \cdot \sqrt{\lambda}}, \quad (2.5)$$

где  $D$  – диаметр трубопровода, м;

$\delta$  – толщина ламинарного слоя, м;

$\lambda$  – коэффициент гидравлического трения.

В представленной формуле диаметр цилиндрической полости можно заменить на гидравлический диаметр, рассматривая полости нецилиндрического сечения. На стенках полостей, по которым движется жидкость, существует некоторая величина неровностей, микронеровности и макронеровности, которые

вливают на режим движения жидкости. Гидравлически гладкими поверхностями считают те, у которых величина слоя  $\delta$  больше величины неровностей, и наоборот те, у которых величина слоя  $\delta$  меньше величины неровностей, называют гидравлически шероховатыми поверхностями. Величина неровностей на поверхности полости непостоянна, таким образом выделяют  $\Delta_{\text{экв}}$  – эквивалентную шероховатость, которая определяет величину потерь напора вследствие трения  $h_{\text{тр}}$ . Также выделяют относительную шероховатость  $\Delta/D$ , которая определяется отношением шероховатости к диаметру рассматриваемой полости.

Присутствие неровностей способствует описанию ламинарного режима движения. Движение жидкости внутри полости можно представить как множество слоев, при движении вблизи стенки имеющая на ней неровность порождает возникновение сил трения, и скорость у слоев вблизи стенки равна нулю. При удалении от стенок скорость каждого следующего слоя увеличивается, предыдущий слой с наименьшей скоростью тормозит следующий, и, таким образом, на максимальном удалении от стенок скорость жидкости имеет максимальное значение. Например, изменение скорости движения жидкости в трубе осуществляется по параболическому закону. Разность скоростей различных потоков жидкости приводит к возникновению сил трения. Эпюра ламинарного движения представлена на рисунке 2.1.

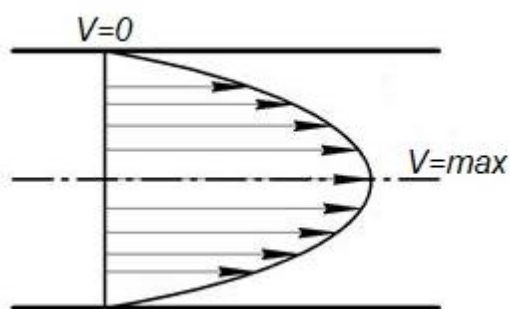


Рисунок 2.1 – Эпюра ламинарного движения

В отличие от ламинарного режима движения жидкости, турбулентный режим движения необходимо описывать как движение, при котором наблюдается беспорядочное движение жидкости. Частицы жидкости в таком режиме движутся по сложным траекториям и постоянно перемешиваются. Возникают

неупорядоченные водовороты вблизи стенок полости, по которой движется жидкость, перемещаясь к центру полости. Вблизи стенок скорость потока равна нулю, при удалении от стенок скорость возрастает, возникают поступательные и вращательные движения, вследствие этого жидкость постоянно перемешивается.

Присутствие неровности в данном случае может являться основным фактором возникновения неупорядоченного движения жидкости. При таком режиме движения происходит постоянное изменение величины и направления скоростей, выделяют мгновенную, усредненную и пульсационную скорость движения жидкости в конкретной точке, мгновенную скорость рассчитывают по формуле:

$$u_x = \bar{u}_x + u'_x, \quad (2.6)$$

Где  $u_x$  – мгновенная скорость;

$\bar{u}_x$  – усредненная скорость;

$u'_x$  – пульсационная скорость.

Перемешивание характеризуется постоянным перемещением частиц жидкости из областей вблизи стенки к центру полости и наоборот, таким образом, частицы жидкости приобретают и теряют скорость пульсационно. Частицы жидкости с малой величиной скорости тормозят частицы с большой величиной, вызывая тормозящий инерционный эффект. Эпюра турбулентного движения представлена на рисунке 2.2.

Распределение скоростей внутри турбулентного потока можно описать следующей схемой взаимодействия. Вблизи стенок с некоторой величиной неровности скорость частиц жидкости равна нулю, в процессе удаления от стенок скорость увеличивается, формируя ламинарный слой некоторой величины с малой скоростью течения, дальнейшее увеличение скорости формирует турбулентное ядро. На пересечении ламинарного слоя и турбулентного ядра происходит значительное увеличение скорости.

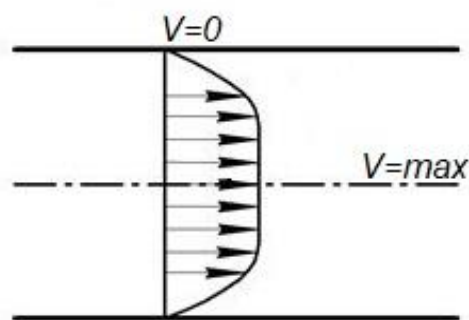


Рисунок 2.2 – Эпюра турбулентного движения

Возникающие потери энергии при движении частиц жидкости и определение величины этих потерь вследствие влияния параметров режимов движения является одним из основополагающих вопросов. Частицы жидкости, двигаясь в массе, теряют энергию в результате соприкосновения со стенками полости, по которому происходит движение, а также потери энергии зависят от геометрических параметров полостей, таких как сужения, выступы, углубления, расширения и прочие конструкторские элементы полостей, которые могут влиять на движение потока и его направление. Также потери энергии связаны с физико-механическими свойствами жидкости, например, с вязкостью.

Определение потерь энергии в результате движения массы жидкости необходимо для расчета величины необходимой энергии для компенсации потерь, возникших при движении жидкости. Потери напора происходят вследствие трения и местных сопротивлений, характеризуемых геометрическими параметрами полости:

$$h_w = h_{тр} \cdot h_{мс}, \quad (2.7)$$

где  $h_{тр}$  – потери напора вследствие трения;

$h_{мс}$  – потери напора вследствие местных сопротивлений.

Расчет потерь напора вследствие трения и местных сопротивлений ведется по следующим формулам:

$$h_{тр} = \lambda \frac{l \cdot v^2}{d_{гидр} \cdot 2g}; \quad (2.8)$$

$$h_{мс} = \xi \frac{v^2}{2g}, \quad (2.9)$$



где  $\xi$  – коэффициент местного сопротивления;  
 $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  
 $l$  – длина трубопровода, м.

В гидромеханике для расчетов потерь напора вследствие трения и местных сопротивлений выделяют среднюю скорость при перемещении жидкости. Такая скорость имеет одинаковую величину во всех точках, при средней скорости за единицу времени через установленное сечение проходит один и тот же объем жидкости. Рассчитывается средняя скорость по формуле:

$$v = \frac{Q}{S}, \quad (2.10)$$

где  $Q$  – объемный расход, м<sup>3</sup>/с;  
 $S$  – сечение потока.

В зависимости от геометрических параметров полостей, по которым течет жидкость, также величины шероховатости стенок изменяет коэффициент трения. Вследствие изменяющихся при движении жидкости по полости параметров, влияющих на режим движения жидкости, коэффициент трения имеет различные величины и зависит от различных факторов. Различают несколько областей, при которых коэффициент трения имеет различную природу возникновения: область ламинарного потока, область турбулентного потока с сохранением ламинарного слоя, переходная область и область квадратичного сопротивления. Таким образом, при различном режиме движения жидкости, характеризующемся различными диапазонами числа Рейнольдса, потери энергии на трение рассчитываются для каждой обозначенной области по-разному.

Первая область ограничивается числом Рейнольдса  $Re < 2300$ , в этом случае нет зависимости от шероховатости, а коэффициент трения линейно зависит от числа Рейнольдса:

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (2.11)$$

Во второй области, в случае, когда толщина ламинарного слоя больше величины шероховатости, она не влияет на коэффициент трения, так как ламинарный слой движущейся жидкости закрывает стенку полости с имеющейся

шероховатостью. Число Рейнольдса в данном случае будет рассчитываться по формуле:

$$\text{Re} = 27 \left( \frac{d}{\Delta} \right)^{1,14}. \quad (2.12)$$

Коэффициент трения определяется по зависимости:

$$\lambda = 0,316 \text{Re}^{-0,25}. \quad (2.13)$$

В переходной области, в отличие от области при турбулентном потоке, когда величина шероховатости не влияет на коэффициент трения, наблюдается следующая схема движения жидкости – ламинарный слой жидкости вблизи стенки меньше величины шероховатости, таким образом, имеющаяся шероховатость непосредственно влияет на поток и увеличивает турбулентность, при увеличении турбулентности жидкость перемешивается, скорость при переходе от стенки в центр полости меняет свою величину и направление, в таком потоке увеличивая сопротивление внутри движущегося потока, таким образом, коэффициент трения определяется по зависимости:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -21g \left[ \frac{\Delta}{3,7} + \left( \frac{6,81}{\text{Re}} \right)^{0,9} \right]. \quad (2.14)$$

Область квадратичного сопротивления характеризуется тем, что коэффициент сопротивления линейно зависит от величины шероховатости. Чем больше величина шероховатости, тем выше возникающее сопротивление потоку. Коэффициент сопротивления выражается зависимостью:

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{D}. \quad (2.15)$$

Процесс заполнения полостей пресс-формы является и турбулентным, и ламинарным на разных участках формообразующих поверхностей в зависимости от геометрических параметров формообразующей полости, микрорельефа и макрорельефа. Поэтому течение высоковязкой жидкости будет происходить по-разному с разным коэффициентом трения. Таким образом, на некоторых участках не будет наблюдаться зависимости режима движения от величины макрорельефа на формообразующей поверхности, а на некоторых участках величина

макрорельефа будет сильно влиять на коэффициент местного сопротивления и коэффициент трения.

При влиянии на величину и направление микро- и макрорельефа при изготовлении полостей, по которым движется жидкость, возможно создать такой макрорельеф, который не будет препятствовать течению жидкости по формообразующей полости.

### **2.3 Математическое моделирование влияния формирования макрорельефа на формообразующих поверхностях с различной траекторией фрезерования на равномерность заполнения различных полостей пресс-форм и алгоритм выбора рациональной траектории фрезерования для каждой конкретной полости**

Выявлено, что на движение высоковязкой жидкости в полостях влияет как микрорельеф, так и макрорельеф на формообразующих поверхностях пресс-форм, который, в свою очередь, возникает из-за режимов и стратегии фрезерования в процессе изготовления деталей. Одними из главных параметров, определяющих высоту шероховатости, являются режимы фрезерования, такие как скорость резания –  $V$ , глубина резания –  $t$  и подача на оборот  $S_o = S_z Z$ , где  $S_z$  – это расстояние, на которое перемещается фреза за время поворота фрезы на угол между двумя соседними зубьями,  $Z$  – это количество зубьев фрезы. Обозначенные параметры фрезерования обуславливаются предъявляемыми требованиями к обрабатываемой поверхности и зависят от множества факторов, таких как обрабатываемый материал, обрабатывающий инструмент, применяемое оборудование, стратегия фрезерования и др. Стратегия фрезерования, в свою очередь, определяется возможностями выбранного оборудования и используемым программным обеспечением. При фрезеровании криволинейных поверхностей сферическими фрезами на обрабатываемой поверхности образуются следы обработки – гребешки  $h$ . Параметры гребешков, и соответственно шероховатость обрабатываемой

поверхности зависят от применяемого инструмента и параметров фрезерования (рисунок 2.3).

Высота и форма гребешка  $h$  зависят от  $S_z$  и  $D$  и рассчитываются по формуле:

$$h = \frac{S_z^2}{4D}, \quad (2.16)$$

где  $S_z$  – подача, мм/зуб;

$D$  – диаметр обрабатывающего инструмента, мм.

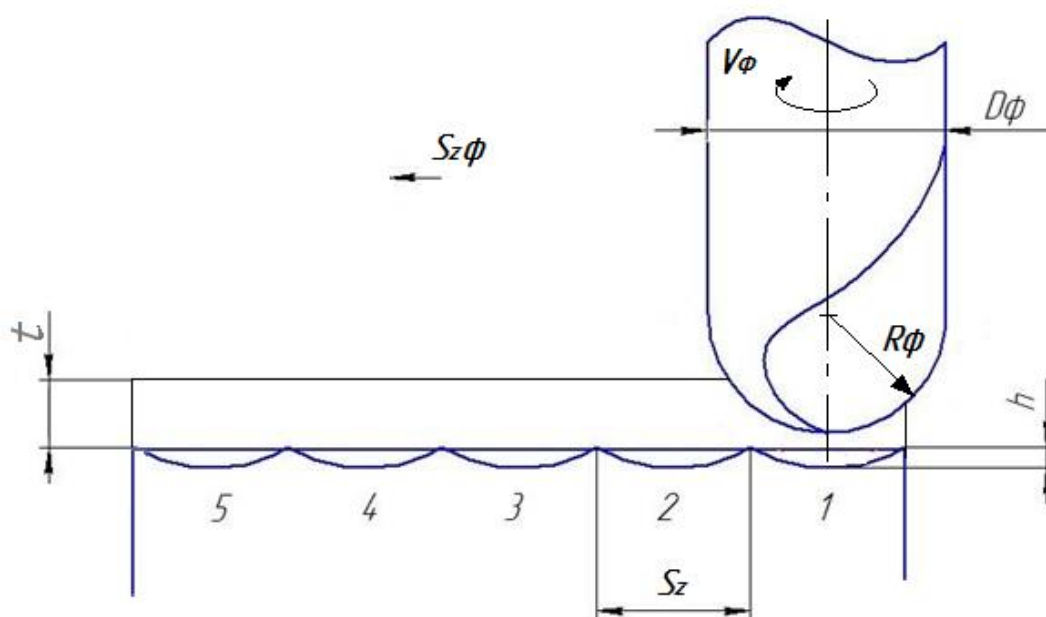


Рисунок 2.3 – Моделирование формирования следов обработки – гребешков при фрезеровании концевой сферической фрезой  $\varnothing D\phi$  с подачей  $S_z$

По известной зависимости при точении такой параметр шероховатости, как наибольшая высота неровностей профиля  $R_{\max}$ , зависит от величины подачи на оборот и радиуса закругления обрабатывающего инструмента [172].

$$R_{\max} = \frac{S_o^2}{8R_p} 1000, \quad (2.17)$$

где  $S_o$  – подача, мм/оборот;

$R_p$  – радиус при вершине пластины, мм.

Чем выше подача и меньше диаметр обрабатывающего инструмента, тем высота неровностей больше, а на практике из-за наличия биения оправки или

смещения центра при установке фрезы относительно осей станка  $h$  может быть значительно выше расчетного, снижение погрешности может достигаться назначением оптимальных режимов резания и выбором необходимого обрабатывающего инструмента [122].

На обрабатываемой формообразующей поверхности микронеровности в виде шероховатости возникают по причинам наличия колебаний обрабатывающего инструмента и детали, пластических деформаций обрабатываемого материала, трения поверхностей инструмента в процессе резания, геометрических неровностей режущей кромки инструмента и наростообразования, а также различных траекторий движения обрабатывающего инструмента относительно заготовки [97].

Кинематические формообразующие движения являются расчетными неровностями и для фрезерования определяются по формуле:

$$R_p = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D^2}{4} - \frac{S_z^2}{4}\right)}, \quad (2.18)$$

где  $R_p$  – расчетная высота неровностей.

Профиль поверхности вследствие движения обрабатывающего инструмента формируется за счет пересечения двух положений режущей кромки инструмента, находящихся на расстоянии, равном подаче. Формируемая при этом высота неровностей может быть рассчитана по вышеприведенным формулам, а может быть определена экспериментальными исследованиями. В работах [163; 23; 97; 119; 163; 165] показаны исследования зависимости формируемой высоты неровностей при фрезеровании в зависимости от режимов резания и геометрических параметров инструмента. Доказано, что расчётная высота неровностей соотносится с наибольшей высотой неровностей профиля  $R_{\max}$  на базовой длине, однако параметр шероховатости  $R_a$  является предпочтительным согласно ГОСТ, и следует руководствоваться таблицей соотношения значений параметров шероховатости.

Сложные криволинейные формообразующие поверхности деталей пресс-форм выполняют в процессе фрезерования на станках с ЧПУ, проводя обработку по трем координатным осям. Схема фрезерования сложной криволинейной формообразующей поверхности с помощью САМ-систем представлена на рисунках 2.4 и 2.5. Можно производить обработку с расположением движения фрезы параллельно к профилю поверхности – вдоль и по нормали к профилю поверхности – поперек, такая технология фрезерования способна сократить трудоемкость процесса фрезерования на станках с ЧПУ путем сокращения строк программы [31].

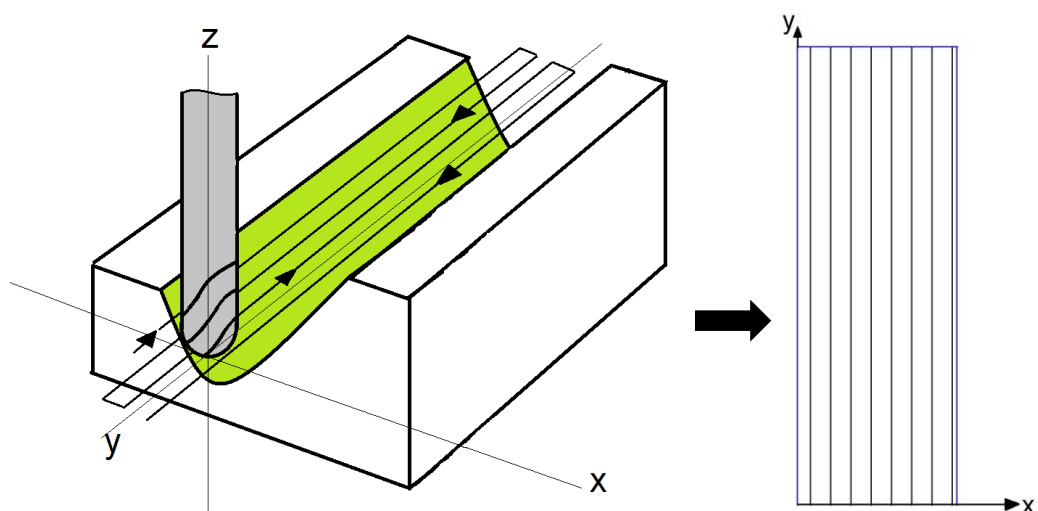


Рисунок 2.4 – Схема фрезерования с траекторией, расположенной вдоль формообразующей поверхности

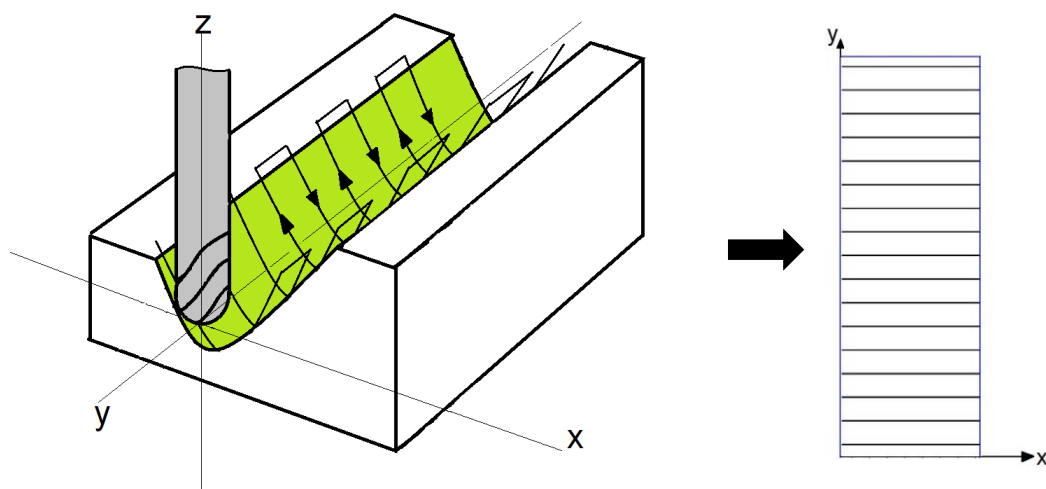


Рисунок 2.5 – Схема фрезерования с траекторией, расположенной поперек формообразующей поверхности

Однако в современном машиностроении при существовании различных САМ-систем формирование большого количества строк в программах не является сложностью, в том числе благодаря мощным вычислительным возможностям ПК и современных станков с ЧПУ. Благодаря развитию вычислительной техники возможно построение траекторий обработки под любым углом на формообразующей поверхности, ограничиваясь лишь геометрическими параметрами заготовки и изготавливаемой детали (рисунок 2.6)

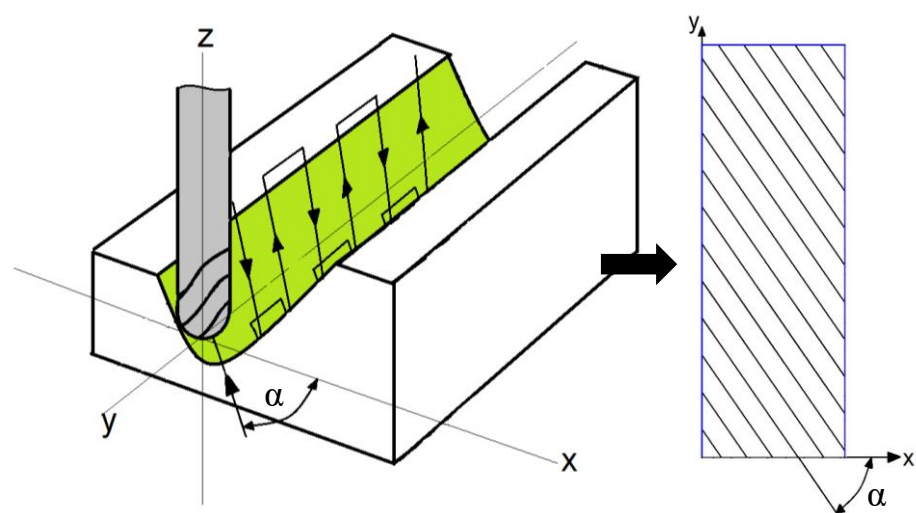


Рисунок 2.6 – Схема фрезерования формообразующей поверхности с траекторией фрезерования под углом  $\alpha$

При фрезеровании сложных криволинейных формообразующих поверхностей концевыми сферическими фрезами между двумя соседними проходами возникает величина остаточного сечения среза – величина макрорельефа между проходами – ребристость  $R$  которая зависит от радиуса кривизны обрабатываемой поверхности, радиуса инструмента и шага между проходами фрезерования  $P_n$  и  $P_{n+1}$  (рисунок 2.7), рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{\Delta S^2}{8} \left( \frac{1}{R_{\text{фр}}} - \frac{1}{\rho} \right), \quad (2.19)$$

где  $R$  – ребристость;

$\Delta S$  – расстояние между строками;

$\rho$  – радиус кривизны обрабатываемой поверхности.

В существующих технологических процессах не учитывается влияние высоты формируемого макрорельефа в результате появления ребристости и его направление в зависимости от траектории фрезерования. Нерационально сформированный макрорельеф на формообразующей поверхности приводит к относительно быстрому износу деталей пресс-форм. Сложная геометрия детали с криволинейными поверхностями обуславливает большое количество операций технологического процесса изготовления формообразующих деталей пресс-форм на станках с ЧПУ. Использование высокоточных многокоординатных станков дает возможность технологу применять рациональную траекторию обработки для получения необходимого макрорельефа формообразующих поверхностей.

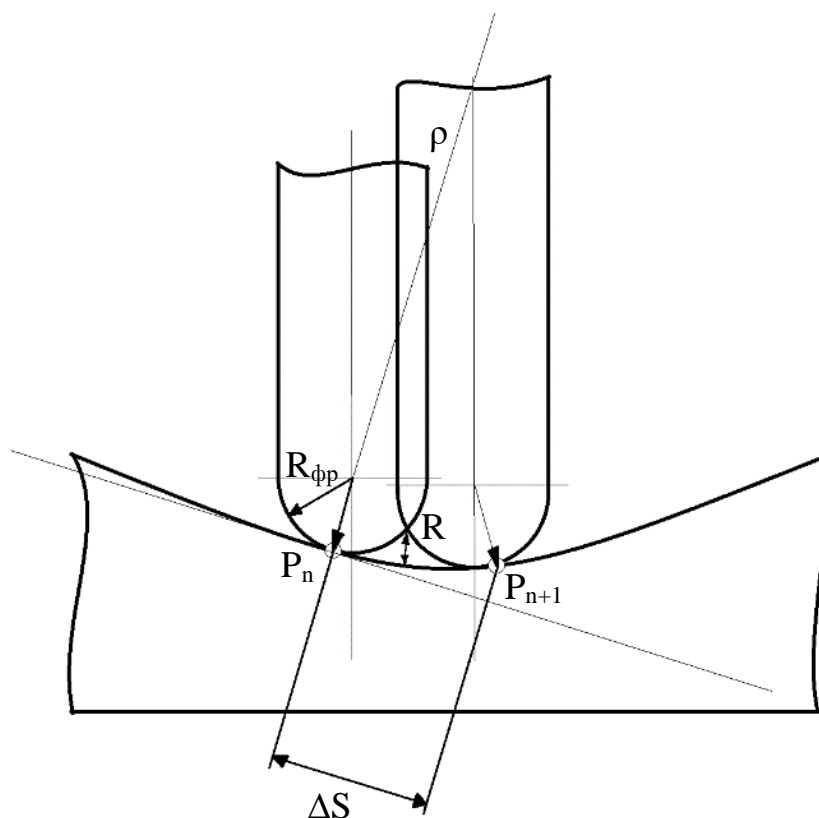


Рисунок 2.7 – Схема формирования ребристости при фрезеровании формообразующей поверхности

Таким образом, необходимым является моделирование формирования макрорельефа на формообразующих поверхностях с различной траекторией фрезерования, что может дать существенный положительный результат при достижении повышения износостойкости деталей формообразующей оснастки.



Форма и размеры формообразующей поверхности и деталей пресс-форм, геометрия изделий, изготавливаемых методом литья под давлением, в совокупности влияют на эффективность технологического цикла литья, скорость заполнения пресс-форм и износ формообразующих поверхностей пресс-формы. Проведен анализ широкой номенклатуры деталей, изготавливаемых методом литья в пресс-формы под давлением, на предприятиях, изготавливающих изделия из ПКМ для различных областей машиностроения. Проанализировано более 2000 деталей, приведена классификация этих деталей по конструкционным геометрическим особенностям (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Анализ конструкций деталей из ПКМ со сложными криволинейными поверхностями, изготавливаемых в пресс-формах

Конструкция деталей	Применение в различных отраслях
Круглые детали различных диаметров	38 %
Плоские детали	19 %
Корпусные детали	15 %
Детали удлиненной формы	26 %
Прочее	2 %

Наиболее сложными для литья под давлением в пресс-формы являются корпусные детали с криволинейными поверхностями, так как их конструкция несет в себе много сложных геометрических элементов, поднутрений и сложно обрабатываемых пазов, ребер и углублений. Пример корпусной детали представлен на рисунке 2.8. Для обеспечения высокого качества получаемой отливки – геометрически сложной корпусной детали необходимым условием литейного технологического процесса является обеспечение максимально высокой скорости заполнения всех полостей – ячеек пресс-форм относительно места впрыска материала точки инъекции А, как правило, располагающейся в центре масс детали, что обуславливает равномерное заполнение всех ячеек детали (рисунок 2.9).

Разделение детали на ячейки ведется таким образом, чтобы образовались простейшие геометрические элементы – ячейки, относительно точки инъекции А. Таким образом, получаем схему формообразующих поверхностей пресс-формы.

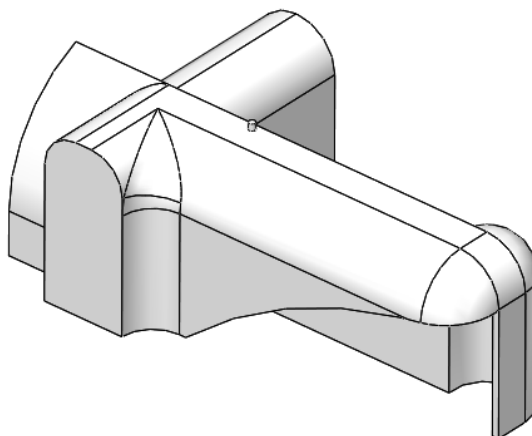


Рисунок 2.8 – Общий вид корпусной детали со сложными криволинейными поверхностями

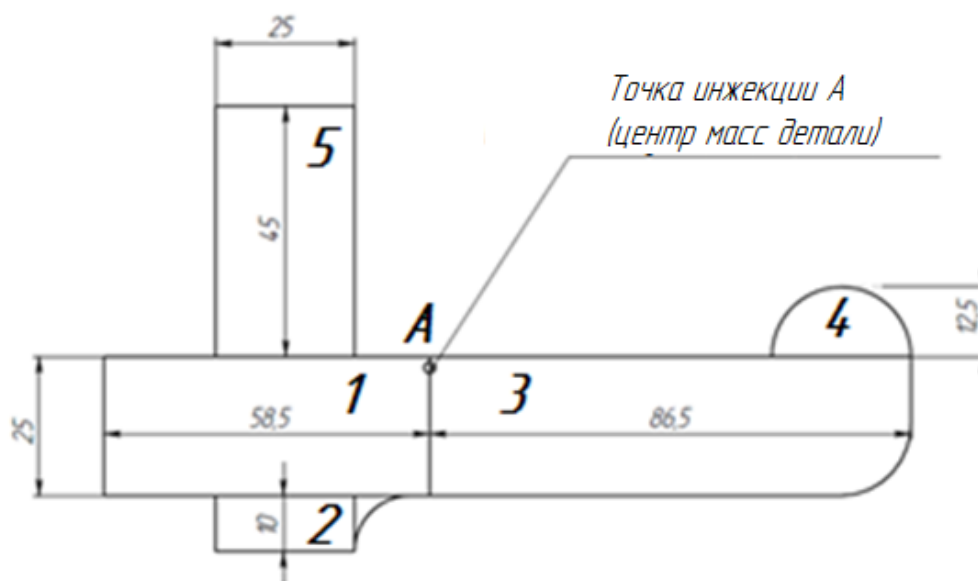


Рисунок 2.9 – Схема формообразующих поверхностей пресс-формы

Для упрощения геометрических элементов корпусной детали под номерами 1–5 указанных на рисунке 2.9 и упрощения дальнейших расчетов при моделировании исключаем элементы скругления (рисунок 2.10, а). Деталь делится на простейшие ячейки, для каждой из которых необходимо определить

направление течения расплава в момент, когда предыдущая ячейка будет заполнена, и подобрать рациональную траекторию движения обрабатывающего инструмента (рисунок 2.10, б).

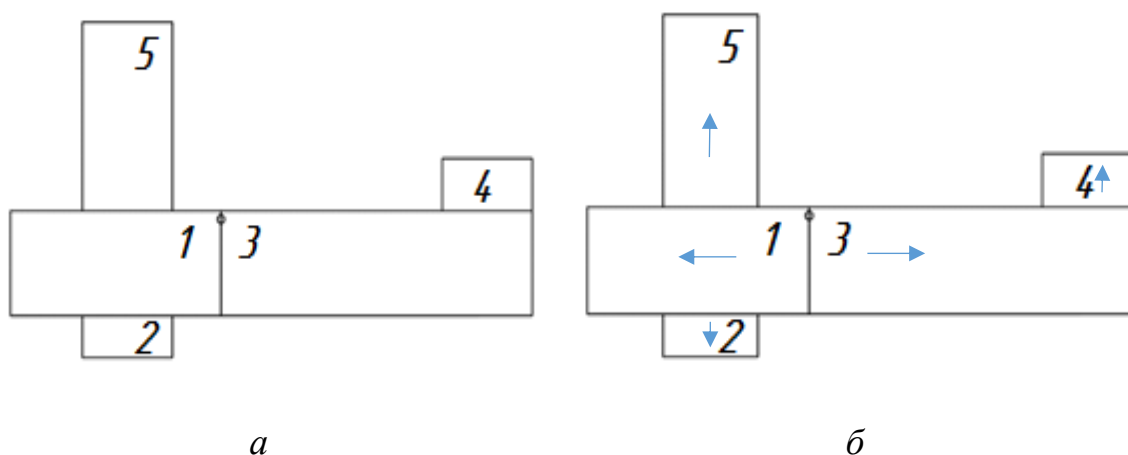


Рисунок 2.10 – Упрощенный вид корпусной детали (а); схема предполагаемого направления течения расплава из точки инъекции А (б)

Для теоретического анализа и моделирования процесса формообразования макрорельефа, исходя из классификации конструктивных особенностей различных деталей для литья под давлением, проведены исследования многополостных форм для определения упрощенных геометрических размеров моделируемых ячеек. Упрощение в данном случае требуется для того, чтобы облегчить и унифицировать процесс моделирования, так как моделирование проливаемости в SolidWorks Plastics для одной ячейки занимает порядка трех-четырёх часов в зависимости от мощности ПК.

Многополостные формы можно разбить на множество отдельных полостей, в каждой из которой направление движение расплава, его скорость и однородность будут различными. На рисунке 2.10 представлена схема формообразующих поверхностей многополостной пространственной формы. Деталь трехмерная, при взгляде на нее сверху по координатам  $x$  и  $y$  мы видим полости, по которым будет двигаться в процессе технологического цикла литья ПКМ. При взгляде на деталь со стороны точки инъекции можно пренебречь координатой  $z$ , так как при анализе конструкций деталей, производимых в пресс-формах, литниковая система

расположена всегда так, что по координате  $z$  размеры детали меньше в сравнении с координатами  $x$  и  $y$ . И именно по полостям расположенных в основных координатах  $x$  и  $y$ , будет двигаться полимерная масса. Несомненно, она движется и по полостям, находящимся в координате  $z$ , и направление течения также будет влиять на параметры литья, однако движением полимерного материала в оси  $z$  можно пренебречь ввиду того, что основная масса материала в начале технологического процесса литья движется по другим полостям, находящимся в точке инъекции.

Также на деталях, производимых в пресс-формах, существуют элементы скругления и различные пространственные переходы, решающие конструкторские и технологические задачи в производственных условиях. При опытном моделировании выявлено, что данные конструктивные особенности ввиду своего малого размера практически не влияют на результаты расчетов, например, если анализировать и моделировать одну деталь с учетом конструктивных особенностей в виде скруглений и переходов и другую деталь, упрощенную, где конструктивные особенности в виде радиуса или перехода с помощью CAD-системы удаляются и моделируются в виде прямого угла, то численная разница в параметрах технологического цикла литья отличается на 1,2–2,7 %, а время моделирования и анализа сокращается с четырех часов до двух. Таким образом, удаляя в CAD-системе конструктивные особенности в целях упрощения схемы полостей детали требуется удалять их и заменять на участки с прямым углом, притом необходимо учитывать, что удаление должно происходить в стороны увеличения или сокращения площади детали в зависимости от того, каким именно является переход, если переход или скругление внешнее, то следует удалять и увеличивать площадь полости, если внутреннее, то следует уменьшать.

После упрощения геометрии детали и получения схемы формообразующих поверхностей многополостной пространственной формы необходимо разделить схему на множество полостей. При разделении схемы на полости следует руководствоваться тем, что полимерный материал движется, занимая свободное пространство каждой конкретной полости. От точки инъекции необходимо

провести горизонтальные линии до противоположных стенок, таким образом мы получим полости первого порядка, которые будут преимущественно влиять на технологический процесс литья и его параметры, движение расплавленной массы будет осуществляется в направлении к стенкам, поэтому вектор движения ПКМ будет сонаправлен с проведенными линиями. После этого при наличии полостей второго и следующего порядков необходимо отсечь их линиями и провести перпендикулярную линию от линии течения расплава полости предыдущего порядка в сторону противоположной стенки. Направление течения расплава в таких полостях будет соответствовать проведенным линиям. Таким образом, мы получим схему участков формообразующих поверхностей многополостных пресс-форм, измененных до простейших полостей.

Определено, что такие ячейки с учетом правил и рекомендаций упрощения будут иметь квадратный или прямоугольный вид, за исключением цилиндрических деталей. Цилиндрические детали имеют отдельную классификацию и определенные сложности при моделировании. Из анализа известно, что такие детали имеют точку инъекции с краю в стенку цилиндрической детали, поэтому различные схемы поверхностей чаще всего неприменимы. Квадратный и прямоугольный вид полостей требует деления на типы, так как при различных размерах характер движения меняется, спроектированы различные типы ячеек с размерами от 5 до 400 мм с шагом в 5 мм, однако при определении главного вектора течения расплава, выявлено, что отличие характера течения материала при процессе технологических параметров литья существует не на всех типах ячеек, связано это с физическими параметрами полимерных материалов такими как вязкость или температура плавления. Исходя из анализа непосредственно при моделировании, выберем несколько типов простейших ячеек формообразующих поверхностей пресс-форм, наиболее часто применяемых размеров при изготовлении деталей из ПКМ. Ячейки размерами 25x25 мм – ячейки малого объема; 25x50 мм – ячейки среднего объема; 25x100 и более – ячейки большого объема мм и  $\varnothing 25$  мм – круглые формы (рисунок 2.11). На такие условные ячейки можно разбить формообразующие поверхности литьевых пресс-форм, в частности

пресс-форму для литья корпусной детали, упрощая ее, и тем самым облегчая поиск рационального макрорельефа для каждой конкретной поверхности литейной пресс-формы.

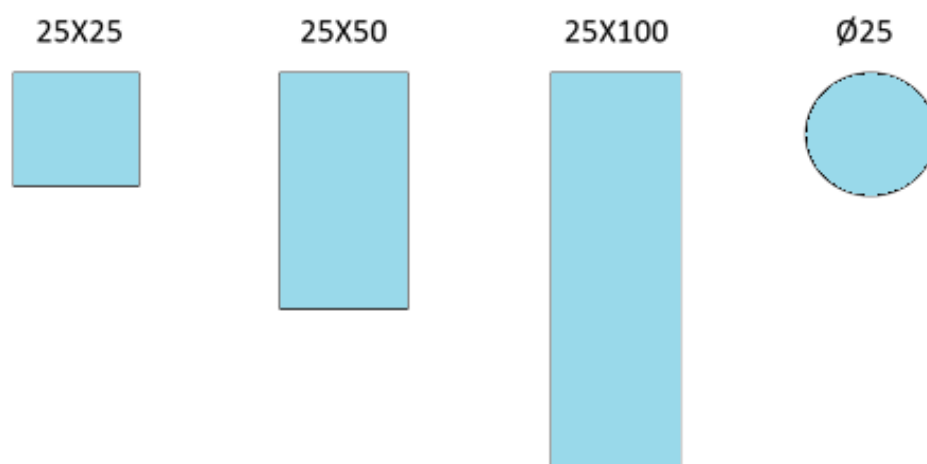


Рисунок 2.11 – Схема разбиения на простейшие ячейки для формообразующих поверхностей пресс-формы для моделирования процесса движения расплава

Выбранные размеры ячеек и разбиение на их типы является условным и лишь демонстрирует механику работы с ячейками различных размеров. Относительно процесса движения расплава и размеров ячейки изменяется характер заполнения полостей в пресс-формах. Ниже рассмотрены ячейки с различными геометрическими параметрами в зависимости от характера движения расплава в литейной полости пресс-формы.

Моделирование процесса движения расплава по формообразующим поверхностям проведено в CAD/CAM/CAE-системе. Программным комплексом автоматизированного проектирования выбран SolidWorks, так как с его помощью возможна разработка сложных технических изделий. Моделирование процессов с помощью систем автоматизированного проектирования является целесообразным, так как изучение процессов и явлений без теоретических результатов будет дорогостоящим. Для исследования моделей в CAD/CAM/CAE-системе SolidWorks использованы теория подобия и анализ размерностей. Применение анализа размерностей позволяет снизить количество исследуемых параметров, и в случае

формирования параметров и характеристик построить математическую модель. Физические величины, как правило, неразрывно связаны между собой, определяя основные физические величины, можно выразить любые остальные через производные. Наибольшее распространение получили такие величины, как масса ( $M$ ), линейный размер ( $L$ ) и время ( $T$ ), примером производных величин будут являться объем ( $W$ ) и температура ( $t$ ). Методы анализа основаны на трудах Фурье, в которых излагается принцип однородности величин и сводится к формулировке: уравнение корректно при одинаковой размерности всех его членов [174]. В таблице 2.3 представлены размерности, используемые при моделировании процессов в SolidWorks.

Таблица 2.3 – Размерности, используемые при моделировании процессов в SolidWorks

Наименование величины	Обозначение величины	Размерность
Длина	$L$	$L$
Объем	$W$	$L^3$
Скорость	$V$	$LT^{-1}$
Кривизна	$k$	$L^{-1}$
Ускорение	$a, g$	$LT^{-2}$
Плотность	$\rho$	$ML^{-3}$
Количество движения	$p$	$MLT^{-1}$
Момент движения	$L$	$ML^2T^{-1}$
Сила	$F$	$MLT^{-2}$
Работа и энергия	$A$	$ML^2T^{-2}$
Мощность	$N$	$ML^2T^{-3}$
Вязкость	$\eta$	$ML^{-1}T^{-1}$
Кинематическая вязкость	$\nu$	$L^2T^{-1}$
Поверхностное натяжение	$\sigma$	$MT^{-2}$
Давление	$P$	$ML^{-1}T^{-2}$
Угловая скорость	$\omega$	$T^{-1}$
Расход	$Q$	$L^3T^{-1}$

Для сокращения числа измеряемых характеристик в САЕ-системах при моделировании и анализе используются различные методы, такие как метод Ипсена, Релея, Барра и другие. Такой подход позволяет снизить предъявляемые требования к мощности используемого оборудования для производимых вычислений.

Для моделирования подобных натуральных процессов основным является анализ размерностей, где все параметры и характеристики, векторные и скалярные, пропорциональны и подобны в соответствующих точках пространства и времени. Для решения моделирования необходимо соблюдать условия подобия:

- подобие однозначности, что значит подобие начальных, граничных, геометрических, кинематических и динамических условий;

- геометрическое подобие, которое характеризуется равенством всех подобных углов  $\alpha$  и пропорциональностью линейных геометрических размеров  $l$  и записывается следующими выражениями:

$$\alpha_{1a} = \alpha_{1b}; \alpha_{2a} = \alpha_{2b}; \dots; \alpha_{ia} = \alpha_{ib}; \quad (2.20)$$

$$\frac{l_{1a}}{l_{1b}} = \frac{l_{2a}}{l_{2b}} = \dots = \frac{l_{ia}}{l_{ib}} = k_l = \text{const}; \quad (2.21)$$

- кинематическое и динамическое подобие, что обуславливается пропорциональностью скоростей, ускорений, сил и напряжений и выражается формулами:

$$\frac{v_{1a}}{v_{1b}} = \frac{v_{2a}}{v_{2b}} = \dots = \frac{v_{ia}}{v_{ib}} = k_v = \text{const}; \quad (2.22)$$

$$\frac{G_{1a}}{G_{1b}} = \frac{G_{2a}}{G_{2b}} = \dots = \frac{G_{ia}}{G_{ib}} = k_G = \text{const}; \quad (2.23)$$

$$\frac{\sigma_{1a}}{\sigma_{1b}} = \frac{\sigma_{2a}}{\sigma_{2b}} = \dots = \frac{\sigma_{ia}}{\sigma_{ib}} = k_\sigma = \text{const}. \quad (2.24)$$

При моделировании коэффициенты  $k_l$ ,  $k_v$ ,  $k_G$ ,  $k_\sigma$  называют коэффициентами подобия, в соответствии с постоянством значения коэффициентов вместо производных можно использовать интегральные аналоги – соотношения их конечных элементов, из чего следует, что предел постоянной величины стремится к значению самой величины, что можно записать выражением:



$$\lim_{\Delta l \rightarrow 0} \left( \frac{l_{2a} - l_{1a}}{l_{2b} - l_{1b}} \right) = \frac{dl_{1a}}{dl_{1b}} = k_l = \text{const.} \quad (2.25)$$

При заполнении полостей пресс-форм полимеры рассматриваются как жидкость со сложными реологическими свойствами [91]. При описании процессов теплопереноса и массопереноса приводятся модели вязкой теплопроводящей жидкости [126].

Уравнение неразрывности имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho v) = 0, \quad (2.26)$$

где  $\rho$  – плотность, а  $v$  – скорость.

Уравнение движения запишем в форме

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\text{grad } p + \text{div } \tau, \quad (2.27)$$

где  $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (v \text{ grad})$  – субстанциональная производная;

$p$  – давление;

$\tau$  – тензор вязких напряжений:

$$\tau_{ij} = 2\mu D_{ij}, \quad i \neq j, \quad (2.28)$$

$$\tau_{ij} = \left( \xi - \frac{2}{3}\mu \right) \text{div } v + 2\mu D_{ij}, \quad (2.29)$$

где  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости;

$\xi$  – вторая вязкость;

$D$  – тензор скоростей деформации:

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v^i}{\partial x^j} + \frac{\partial v^j}{\partial x^i} \right), \quad (2.30)$$

где  $x = (x^1, x^2, x^3)$  – декартовы координаты.

Уравнение теплопроводности записывается в следующем виде:

$$C_p \rho \frac{dT}{dt} = \text{div} (k \text{ grad } T) + \Phi, \quad (2.31)$$

где  $C_p$  – теплоемкость при  $p = \text{const}$ ;

$T$  – температура;

$k$  – коэффициент теплопроводности;

$\Phi$  – диссипативная функция:

$$\Phi = \operatorname{div}(\tau v) - v \operatorname{div} \tau. \quad (2.32)$$

Представленная система уравнений (2.26) – (2.32) является базовой для получения простых моделей. Более простые модели достигаются с помощью применения ряда приближений и допущений.

Первое из них, приближение несжимаемости, которое можно использовать при исследовании движения расплавленного полимера [126]. В этом случае, при постоянном давлении уравнение неразрывности 2.26 принимает вид

$$\operatorname{div}(v) = 0. \quad (2.33)$$

Для компонентов тензора вязких напряжений получим

$$\tau_{ij} = 2\mu D_{ij}. \quad (2.34)$$

Диссипативная функция  $\Phi$  упрощается и записывается следующим образом:

$$\Phi = \frac{1}{2} \mu \left( \frac{\partial v^i}{\partial x^j} + \frac{\partial v^j}{\partial x^i} \right)^2. \quad (2.35)$$

Вторым допущением в некоторых случаях может являться допущение вязкого течения. Таким образом, в уравнении теплопроводности не учитывается левая часть

$$0 = -\operatorname{grad} p + \operatorname{div} \tau, \quad (2.36)$$

Для компонентов тензора вязких напряжений в этом случае получим

$$0 = -\operatorname{grad} p + \operatorname{div} (2\mu D), \quad (2.37)$$

Учитывая приведенные допущения запишем определяющие уравнения процесса заполнения в декартовых координатах.

Уравнение неразрывности примет вид

$$\frac{\partial v^i}{\partial x^i} = 0. \quad (2.38)$$

Для тензора скоростей деформаций получим

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial x^i} + \frac{\partial}{\partial x^j} \left( \mu \left( \frac{\partial v^i}{\partial x^j} + \frac{\partial v^j}{\partial x^i} \right) \right). \quad (2.39)$$

Уравнение теплопроводности записывается следующим образом:

$$C_p \rho \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v^i \frac{\partial T}{\partial x^i} \right) = \frac{\partial}{\partial x^j} \left( k \frac{\partial T}{\partial x^j} \right) + \frac{1}{2} \mu \left( \frac{\partial v^i}{\partial x^j} + \frac{\partial v^j}{\partial x^i} \right)^2. \quad (2.40)$$

Данная система уравнений дополняется соответствующими начальными и граничными условиями. В начальный момент времени задается поле скоростей течения и начальное распределение температуры. На входе в заполняемую полость на границе  $\Omega_1$  температура равна температуре расплава. На твердых стенках  $\Omega_2$  ставятся условия непротекания и прилипания, что дает

$$v(x, t) = 0, x \in \partial\Omega_2. \quad (2.41)$$

На входе в полость задается распределенный поток расплава, что моделируется граничным условием

$$v(x, t) = v_0(x, t), x \in \partial\Omega_1. \quad (2.42)$$

На свободной границе расплава задаются два типа граничных условий – кинематические и динамические. Уравнение границы расплава имеет вид

$$F(x, t) = 0. \quad (2.43)$$

Кинематическое условие отражает факт непокидания части сплошной среды границы

$$\frac{\partial F}{\partial t} + v^i \frac{\partial F}{\partial x^i} = 0. \quad (2.44)$$

Первое динамическое условие неучета противодавления и поверхностного натяжения имеет вид:

$$-pn_i + \tau_{ij}n_j = 0, \quad (2.45)$$

где  $n$  – вектор нормали к границе.

Второе динамическое условие отражает баланс сил в касательном направлении и записывается следующим образом:

$$\tau_{ij}v_j = 0, \quad (2.46)$$

где  $v_j$  – компоненты касательного вектора.

Полость представляет собой тонкую щель переменного сечения, срединная поверхность щели предполагается плоской. Для получения основных уравнений используется приближение тонкого слоя. Пусть  $x^3 = z$  – поперечная координата, а  $x^1 = x, x^2 = y$  – продольные координаты. Упрощенная система уравнений имеет вид

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (2.47)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (2.48)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad (2.49)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0, \quad (2.50)$$

$$C_p \rho \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2, \quad (2.51)$$

где  $u$ ,  $v$ ,  $w$  – соответствующие компоненты скорости  $v$ .

Для моделирования процесса движения расплава, движущегося по поверхности, в соответствии с анализом размерности заданы следующие начальные параметры в CAD/CAM/CAE-системе SolidWorks: свойства полимерного композиционного материала ПА66КС (таблица 2.4), температура плавления материала 280–290°C, давление впрыска 140 МПа. Материал ПА66КС выбран как наиболее используемый в настоящее время, более 90 % всех изделий из ПКМ изготавливаются из этого материала или его аналога. На поверхности простейших ячеек смоделирован макрорельеф, с высотой остаточного сечения среза, рассчитанного по формуле (2.19), а также с высотой гребешка, рассчитанного по формулам (2.16) и (2.18), при  $S_z=0,15$  мм и  $D=6$  мм. Высота гребешка  $h = 0,00141$  мм и равна наибольшей высоте неровностей профиля, что согласно таблице соотношения параметров шероховатости, соответствует  $Ra=0,4$ . Такая высота гребешка, а соответственно величина шероховатости, выбрана для наглядности и смоделирована при обработке на станках ЧПУ с различными стратегиями фрезерования с использованием выбранного инструмента концевой монолитной сферической фрезы Iscar  $\varnothing 6$  мм EB-A2 06-12/22C06M80 для чистового фрезерования. Применение сферических фрез расширяет возможности фрезерования и позволяет без проблем обработать криволинейные участки формообразующих поверхностей литейных пресс-форм, а выбор инструмента обусловлен анализом геометрических форм и размеров обрабатываемых рабочих частей пресс-форм, а именно минимальным радиусом закругления на формообразующих поверхностях матриц и пуансонов.

Проведены теоретические исследования влияния траектории обработки на заполнение объема полимерным композиционным материалом, для более тщательного изучения процесса фрезерования на процесс заполнения пресс-форм было принято решение рассмотреть варианты фрезерования формообразующих пресс-форм с различными углами по отношению к главному вектору. Для каждой простейшей ячейки проведено математическое моделирование процесса литья с использованием автоматизированного программного комплекса. В САЕ-системе SolidWorks Plastics определяется множество векторов ( $\vec{V}_1, \vec{V}_2.. \vec{V}_n$ ), суммы которых обозначим как главный вектор ( $\vec{R}$ ), главный вектор течения расплава показывает направление движения массы расплавленного материала (рисунок 2.12). Выявлена коллинеарность вектора течения расплава и вектора направления движения материала в точке инъекции.

Таблица 2.4 – Свойства композиционного полимерного материала ПА66КС для изготовления изделий методом литья под давлением

Параметр	Значение
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,36
Прочность при растяжении, МПа	128
Модуль упругости при растяжении, МПа	8000

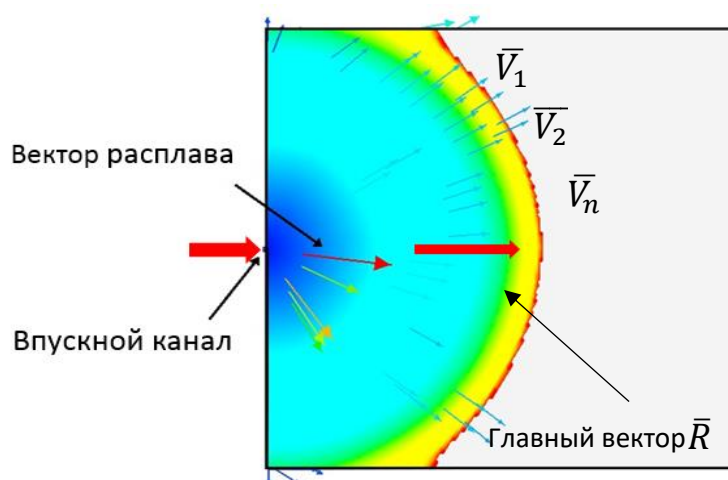


Рисунок 2.12 – Результаты моделирования в САЕ-системе при определении главного вектора течения расплава без учета параметров рельефа поверхности

Таким образом, определив, что главный вектор течения расплава сонаправлен с вектором движения расплава в точке инъекции, установим для каждой простейшей ячейки направление главного вектора, согласно анализу конструктивных особенностей деталей, изготавливаемых в пресс-формах (рисунок 2.13).

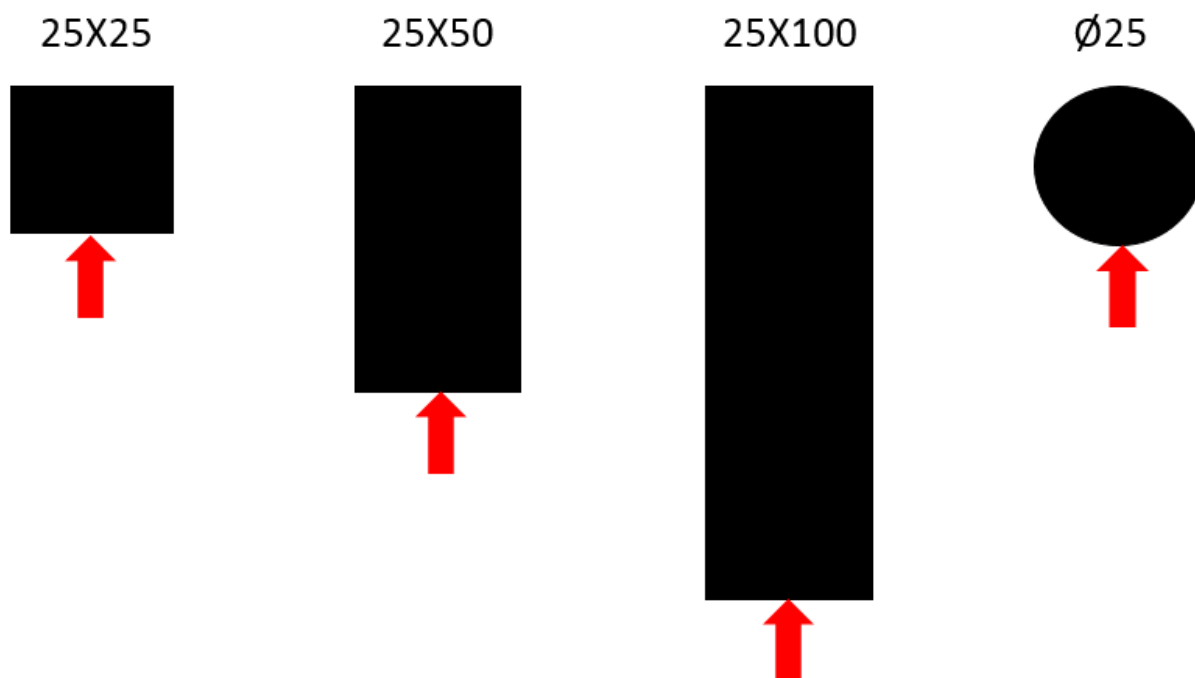


Рисунок 2.13 – Направление главного вектора течения расплава для каждой простейшей ячейки

Влияние рельефа формообразующих поверхностей обусловлено следующей схемой взаимодействия расплава и формообразующей поверхности. Расплав встречает препятствие при движении по формообразующей поверхности в виде гребешков – остаточного сечения среза, формирующих ребристость.

Выдвинута гипотеза о том, что чем меньше количество времени тратится на заполнение полости текучим материалом, тем меньше сопротивление в процессе течения он встречает по пути движения, тем меньше изнашивается формообразующая поверхность полостей в результате движения расплава по направленному макрорельефу в пресс-форме. Критериями оценки рационального направления макрорельефа – траектории течения расплава внутри полости –

выбраны такие параметры, как расчетное время заполнения  $T_3$  и время охлаждения  $T_0$ , которые рассчитываются программным комплексом SolidWorks автоматически, с граничными условиями по углу направления движения фрезы  $\alpha$ . Наилучшим результатом считается наименьшее время цикла литья, определяемое по формуле:

$$T_{\text{общ}} = T_3 + T_0, \quad (2.52)$$

где  $T_3$  - расчетное время заполнения простейшей ячейки, с;

$T_0$  - расчетное время охлаждения простейшей ячейки, с.

Относительно главного вектора назначим угол направления движения фрезы  $\alpha$  для формирования ребристости – макрорельефа заданной высоты. При моделировании в CAD/CAE-системах были рассмотрены углы от  $5^\circ$  до  $180^\circ$  с шагом  $5^\circ$  для всех размеров ячеек.

В CAD-системе SolidWorks моделировалась ячейка некоторых размеров, характеризующая полость, по которой течет полимерный композиционный материал. Затем на поверхность этой полости наносится макрорельеф, соответствующий следам обработки, возникающий в процессе фрезерной операции в результате воздействия фрезерным инструментом. Формируемый макрорельеф – ребристость располагался под определенным углом на поверхности полости, а затем проводилось CAE-моделирование заполнения расплавом через точку инъекции.

Последовательно с шагом  $5^\circ$  изменялось направление макрорельефа относительно главного вектора течения расплава и проводилось моделирование процесса заполнения полости. В результате проведенного теоретического исследования получены данные об однородности и времени заполнения полостей различных размеров с различным направлением макрорельефа.

Определено, что необходимых параметров технологического цикла литья, а именно наименьшее общее время цикла  $T_{\text{общ}}$ , удастся достичь не при всех значениях угла  $\alpha$ : на некоторых участках значение угла слабо влияло на параметры технологического цикла литья, на других изменение угла давало значительные результаты в сторону снижения общего время цикла  $T_{\text{общ}}$  даже при небольшом изменении угла моделирования макрорельефа, наилучшие параметры были

выявлены при углах 45°, 90°, 180° на полостях различной конфигурации и отношении сторон, часть данных моделирования заполняемости полостей представлена в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты математического моделирования определения  $T_{\text{общ}}$  в зависимости от размеров полости и угла направления макрорельефа  $\alpha$

Размер ячейки, мм	Угол направления макрорельефа $\alpha$												
	35	40	45	50	55	80	85	90	95	100	170	175	180
-	35	40	45	50	55	80	85	90	95	100	170	175	180
25x15	1,65	1,62	1,59	1,6	1,61	1,66	1,67	1,68	1,69	1,7	1,84	1,85	1,85
25x20	2,13	2,11	2,09	2,1	2,1	2,13	2,14	2,14	2,15	2,16	2,24	2,25	2,25
25x25	2,61	2,6	2,59	2,69	2,79	3,29	3,39	3,46	3,41	3,37	2,81	2,77	2,65
25x30	2,84	2,83	2,82	2,92	3,02	3,52	3,62	3,89	3,83	3,77	2,93	2,87	2,86
25x35	3,54	3,53	3,52	3,59	3,66	4,01	4,08	4,39	4,34	4,3	3,67	3,62	3,56
25x40	4,24	4,23	4,22	4,25	4,28	4,43	4,46	4,79	4,76	4,73	4,31	4,28	4,26
25x45	4,94	4,93	4,92	4,93	4,94	4,99	5	5,09	5,08	5,07	4,96	4,95	4,96
25x50	5,63	5,62	5,62	5,61	5,57	5,37	5,33	5,29	5,31	5,33	5,61	5,63	5,66
25x55	5,87	5,87	5,86	5,82	5,78	5,58	5,54	5,5	5,52	5,54	5,82	5,84	5,86
25x60	6,57	6,57	6,56	6,52	6,48	6,28	6,24	6,2	6,22	6,24	6,52	6,54	6,56
25x65	7,27	7,27	7,26	7,22	7,18	6,98	6,94	6,9	6,92	6,94	7,22	7,24	7,26
25x70	7,97	7,97	7,96	7,92	7,88	7,68	7,64	7,6	7,62	7,64	7,93	7,95	7,97
25x75	8,67	8,67	8,66	8,62	8,58	8,38	8,34	8,3	8,32	8,34	8,62	8,64	8,66
25x80	9,37	9,36	9,36	9,32	9,28	9,08	9,04	9	9,02	9,04	9,32	9,34	9,36
25x85	10,1	10,1	10,1	10	9,98	9,78	9,74	9,7	9,72	9,74	10	10	10,1
25x90	10,8	10,8	10,8	10,7	10,7	10,5	10,4	10,4	10,4	10,4	10,7	10,7	10,8
25x95	11,5	11,5	11,5	11,4	11,4	11,2	11,1	11,1	11,1	11,1	11,2	11,2	11,2
25x100	11,5	11,8	11,9	12	12,1	12,2	12,3	12,3	11,8	11,7	11,4	11,4	11,3
25x105	12,1	12,1	12,1	12,2	12,2	12,3	12,4	12,4	12,4	12,3	12	12	11,9
25x110	12,7	12,8	12,8	12,8	12,8	13	13,1	13,1	13,1	13	12,6	12,6	12,5
25x115	13,3	13,3	13,3	13,4	13,4	13,6	13,6	13,7	13,6	13,6	13,2	13,2	13,1
25x120	13,9	14	14	14,1	14,1	14,3	14,3	14,4	14,3	14,3	13,8	13,8	13,7
25x125	14,5	14,6	14,6	14,7	14,7	14,9	14,9	15	14,9	14,9	14,4	14,4	14,3
25x130	15,2	15,2	15,3	15,3	15,4	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	15	15	14,9

В результате моделирования видно, что для одних ячеек общее время цикла  $T_{\text{общ}}$  является минимальным при одном значении направления макрорельефа, для других – другое значение направления. Для некоторых ячеек изменение угла смоделированного макрорельефа не влияет на заполняемость ячейки, однако для упрощения моделирования выделим основные эффективные углы  $\alpha$ . Углу  $\alpha$  присвоим значения относительно главного вектора: 45° – зеленый цвет, 90° – синий



цвет,  $180^\circ$  – желтый цвет (рисунок 2.14) и рассмотрим влияние моделируемой траектории формирования ребристости поверхности – макрорельефа с различным направлением – на параметры при технологическом цикле литья.

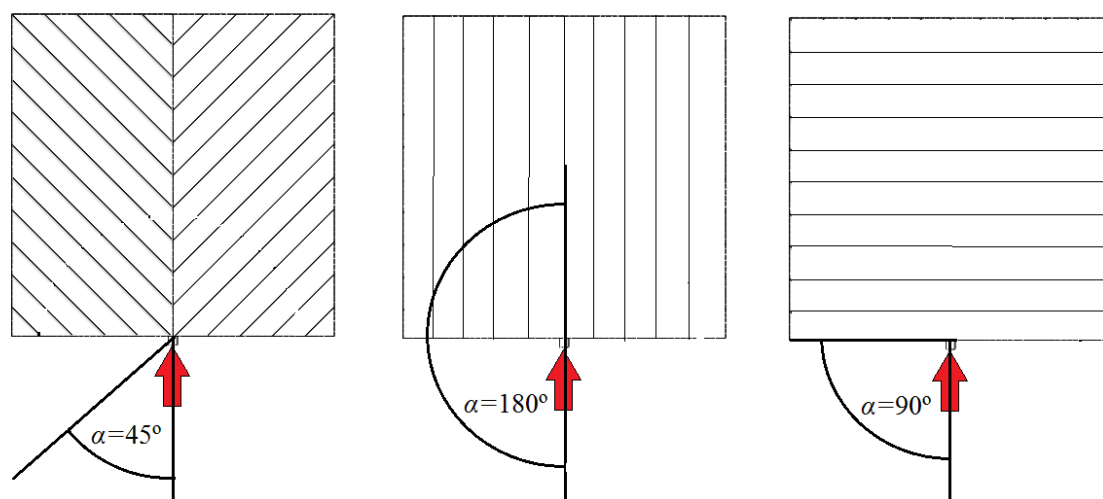


Рисунок 2.14 – Значения угла движения фрезы  $\alpha$  относительно главного вектора на примере простейшей ячейки 25x25мм.

Выполнено моделирование процесса литья с рельефом формообразующих поверхностей после фрезерования с различными углами направления траектории движения фрезы по отношению к главному вектору движения расплава и рассчитаны технологические параметры цикла литья  $T_z$ ,  $T_o$ ,  $T_{общ}$  с помощью CAD/CAM/CAE-системы SolidWorks (таблица 2.5).

На рисунке 2.15 показан момент времени  $T_z = 0,635$  с, равный половине времени заполнения полости с наименьшим результатом  $\min T_z$ , видно, что процент заполнения полости материалом при траектории движения фрезы с углом  $\alpha = 45^\circ$  выше, а именно 54 %. Для траектории фрезы с углом  $\alpha = 180^\circ$  и  $\alpha = 90^\circ$  несколько ниже, 46 % и 28 % соответственно. Анализ результатов моделирования показал, что для полости 25x25мм рациональным будет являться угол направления траектории движения фрезы  $\alpha = 45^\circ$ , видно, что при таком угле происходит заполнение простейшей полости, которое выполняется за минимальное время цикла литья  $T_{общ}$ , а также наблюдается равномерное распределение остаточного давления  $P$ , МПа, что показано на рисунке 2.16.

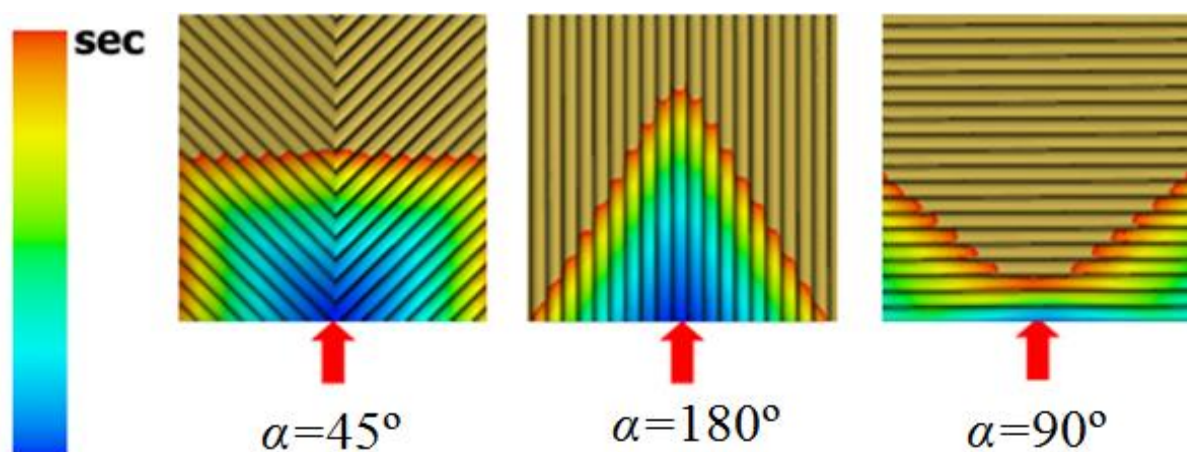


Рисунок 2.15 – Визуализация результатов расчета времени заполнения  $T_3$  на основе CAE-моделирования движения расплава на примере полости 25x25мм с различным рельефом на формообразующей поверхности при различных траекториях движения фрезы

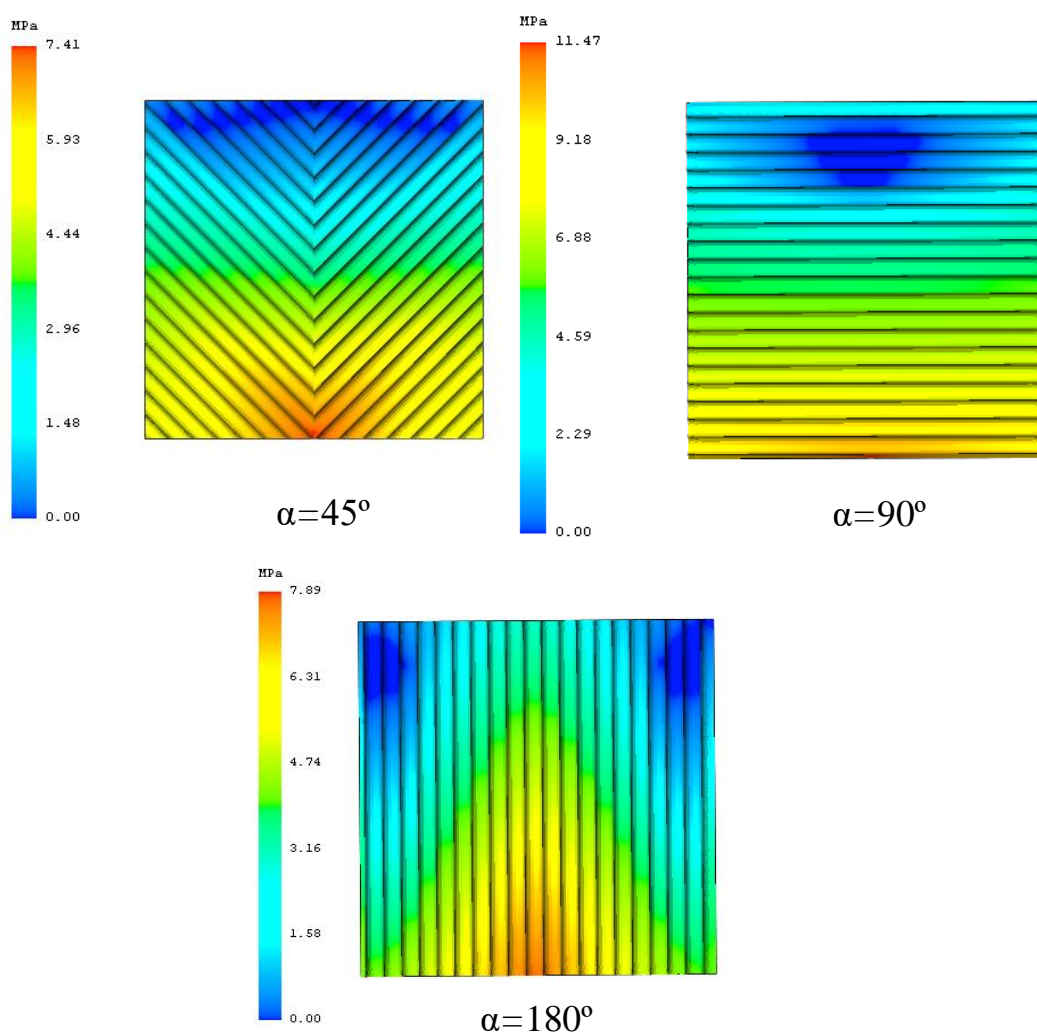


Рисунок 2.16 – Распределение остаточного давления в простейшей полости в процессе технологического цикла литья

Наблюдается, что в полости, обработанной по траектории движения фрезы с углом  $\alpha=45^\circ$ , равномерное распределение остаточного давления, а его значение  $P=7,41$  МПа, для ячейки, смоделированной с направлением макрорельефа под углом  $\alpha=180^\circ$  остаточное давление несколько выше, а именно  $P=7,89$  МПа, а для ячейки при  $\alpha=90^\circ$  остаточное давление значительно выше, что свидетельствует о препятствовании макрорельефа движению расплава по формообразующим поверхностям. Примечательно, что при моделировании полости  $25 \times 25$  мм, охлаждение проходит не только с наименьшим временем  $T_0$ , а также имеет более равномерный характер (рисунок 2.17). Аналогичные результаты будут справедливы и для других квадратных полостей любых размеров.

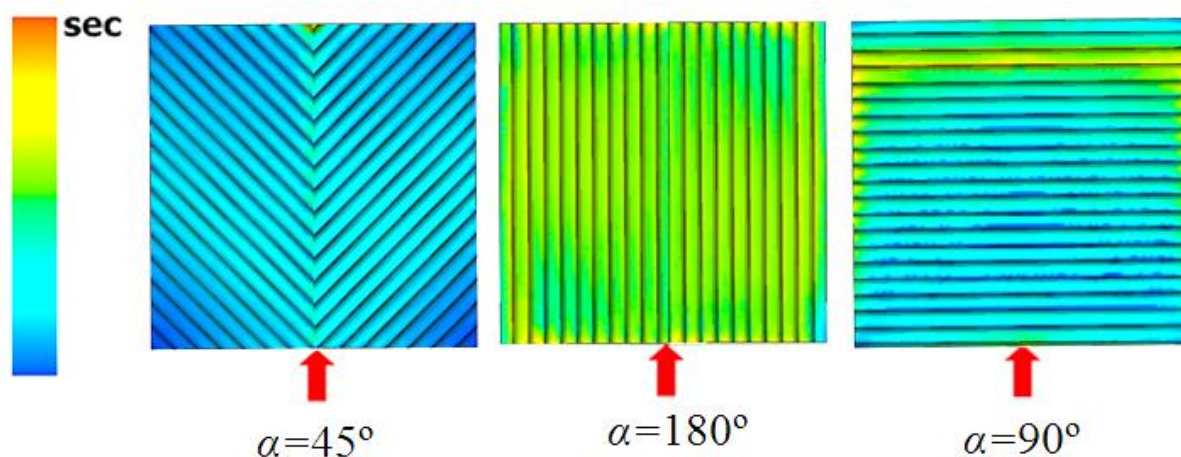


Рисунок 2.17 – Характер охлаждения на примере простейшей ячейки  $25 \times 25$  мм

В результате анализа с направлением макрорельефа под углом  $\alpha=45^\circ$  и  $\alpha=180^\circ$  видим что охлаждение происходит равномерно, однако в случае  $\alpha=180^\circ$  требуется больше времени  $T_0$ , при моделировании полости с углом  $\alpha=90^\circ$  наблюдается неравномерный характер охлаждения, что недопустимо при формировании изделий из ПКМ в пресс-формах.

В результате анализа получены данные о рациональном направлении макрорельефа, определяемым углом направления рельефа  $\alpha$  относительно главного вектора течения расплава  $\bar{R}$ . Выявлено, что при некотором направлении

макрорельефа, формируемого при фрезеровании, такой параметр технологического цикла литья, как  $T_{\text{общ}}$ , будет наименьшим, обеспечивая минимальное сопротивление потоку расплава во время движения, именно это направление макрорельефа можно считать рациональным. В результате уменьшается изнашиваемость пресс-формы и повышается производительность технологического цикла литья, а также снижается себестоимость отлитых деталей.

Таблица 2.5 – Результаты моделирования и расчетов влияния траектории фрезерования на производительность процесса литья для полостей различных размеров

Размер простейшей полости, мм	Угол траектории фрезы по отношению к главному вектору движения расплава $\alpha$ , °	Время заполнения $T_z$ , с	Время охлаждения $T_o$ , с	Общее время цикла $T_{\text{общ}}$ , с
25x25	45	1,271	1,328	2,599
25x25	90	1,723	1,739	3,462
25x25	180	1,286	1,359	2,645
25x50	45	2,689	2,930	5,619
25x50	90	2,585	2,701	5,286
25x50	180	2,615	3,041	5,656
25x100	45	5,850	6,054	11,904
25x100	90	6,054	6,245	12,299
25x100	180	5,481	5,841	11,322
Ø 25	45	2,341	2,049	4,390
Ø 25	90	2,541	2,150	4,691
Ø 25	180	2,103	2,117	4,222

Впервые установлена теоретическая взаимосвязь скорости заполнения пресс-формы от направления макрорельефа формообразующих поверхностей, который, в свою очередь, зависит от размеров и конфигурации простейшей ячейки.

## 2.4 Установление закономерности влияния направленности макрорельефа формообразующих поверхностей на технологические параметры литья изделий из полимерных композиционных материалов в пресс-форме

Технология направленного формирования макрорельефа зависит от величины остаточного сечения среза и от ее направленности, возникающей во время фрезерования, таким образом, становится необходимым определение влияния этих показателей на технологические параметры литья изделия из ПКМ в пресс-форме путем анализа результатов математического моделирования формирования макрорельефа на формообразующих поверхностях с различной траекторией фрезерования. Сведем в таблицу все технологические параметры, полученные в результате моделирования заполнения полостей (таблица 2.6).

Таблица 2.6 – Технологические параметры литья для полостей различных размеров

Размеры простейшей ячейки, мм	Угол моделирования движения фрезы $\alpha$ , °	Время заполнения $T_z$ , с	Время охлаждения $T_o$ , с	Общее время цикла $T_{общ}$ , с	Остаточное давление $P$ , МПа	Заполнение ячейки при $T_z/2$ при $\min T_z$ , %
25x25	45	1,271	1,328	2,599	7,41	54
25x25	90	1,723	1,739	3,462	11,47	28
25x25	180	1,286	1,359	2,645	7,89	46
25x50	45	2,689	2,930	5,619	16,98	48
25x50	90	2,585	2,701	5,286	15,86	57
25x50	180	2,615	3,041	5,656	17,53	44
25x100	45	5,850	6,054	11,904	38,99	46
25x100	90	6,054	6,245	12,299	45,63	30
25x100	180	5,481	5,841	11,322	32,44	51
Ø 25	45	2,341	2,049	4,390	5,32	49
Ø 25	90	2,541	2,150	4,691	6,02	38
Ø 25	180	2,103	2,117	4,222	4,91	58

По результатам моделирования можно сделать выводы, что для полостей малых размеров (25x25 мм) рациональным является угол  $\alpha=45^\circ$ , так как при этом угле обеспечивается более быстрое и равномерное достижение материалом границ полости. При движении материала в направлении главного вектора течения расплава, сформированный макрорельеф под углом  $\alpha=45^\circ$  в стороны наиболее удаленных границ полости позволяет достичь минимального значения  $T_3$ .

Для полостей средних размеров (25x50 мм) рациональным является угол  $\alpha=90^\circ$ , при давлении впрыска материал подается вперед по направлению главного вектора течения расплава, здесь макрорельеф помогает материалу быстрее двигаться в поперечном направлении, что обеспечивает ускорение движения и минимальное общее время заполнения полости.

Для длинных полостей (25x100 мм), рациональным является угол  $\alpha=180^\circ$ , в данном случае времени, чтобы достигнуть боковых границ, достаточно, а продольный макрорельеф способствует наиболее быстрому продвижению материала до конечной границы.

Для полостей  $\varnothing 25$  мм рациональным является угол  $\alpha=180^\circ$ , в отличие от полостей малых размеров (25x25 мм), у материала нет необходимости достигать дальних углов, поэтому давления впрыска достаточно, чтобы обеспечить максимальную производительность технологического цикла литья (рисунок 2.17). Метод обработки формообразующих поверхностей с применением результатов и расчетов влияния траектории фрезерования на производительность процесса литья для полостей различных размеров назовем методом направленного формообразования макрорельефа.

Из результатов моделирования видно, что время  $T_{\text{общ}}$  изменяет свое значение в зависимости от направления траектории движения фрезы, и в зависимости от вида полости производительность технологического цикла литья увеличивается до 25 %. Результаты анализа общего времени технологического цикла литья  $T_{\text{общ}}$  оформлены в графиках для каждого типа простейшей полости и представлены на рисунке 2.18.

При математическом моделировании процесса фрезерования по технологии направленного формирования макрорельефа необходимо учитывать геометрические параметры полостей в пресс-формах.

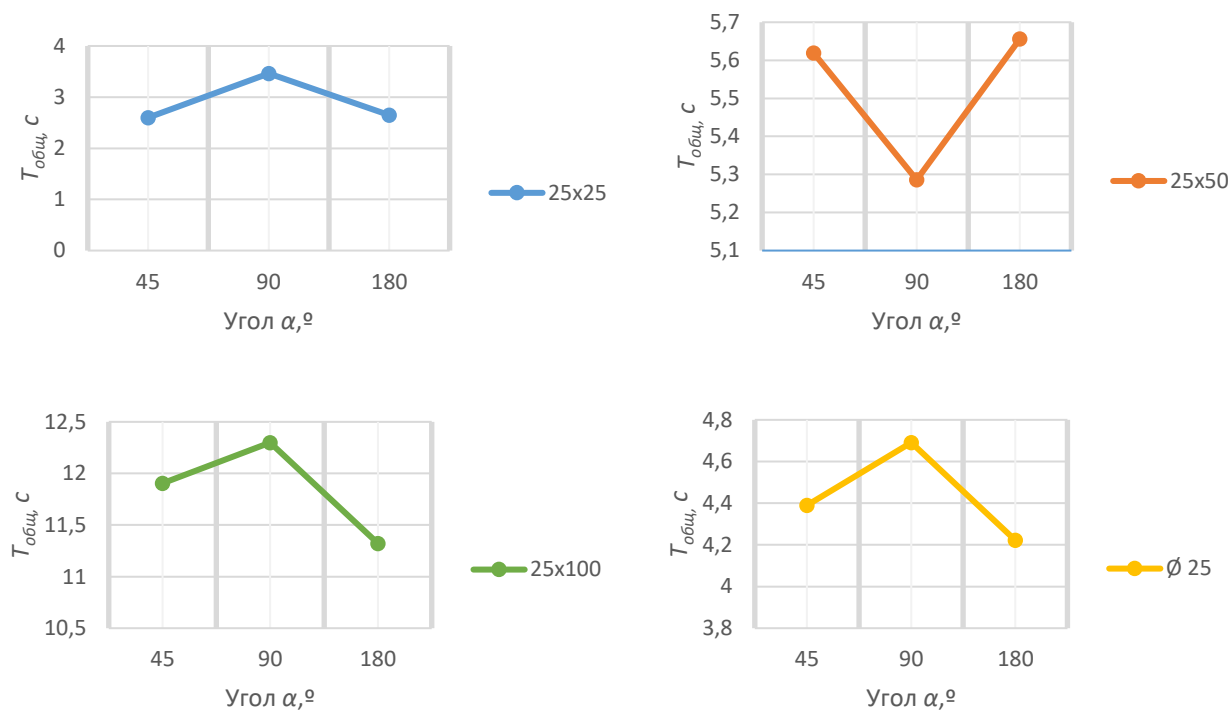


Рисунок 2.18 – Графики влияния угла  $\alpha$  между направлением траектории и главным вектором движения расплава на время цикла литья  $T_{общ}$

При идентичных граничных условиях по математическим моделям заметно что в случае простейшей полости малых размеров (25x25 мм), при сформированном макрорельефе под углом  $\alpha=45^\circ$  обеспечивается минимальное остаточное давление. Повышенное давление создает определенные сложности в процессе технологического цикла литья и значительно может снижать производительность получения отливок, так как высокое остаточное давление затрудняет съем изделия с пресс-формы. Также остаточное давление приводит к наличию внутренних напряжений и отрицательно сказывается на эксплуатационных характеристиках, механических свойствах и качестве отливаемого изделия. В свою очередь на возникновение внутренних напряжений



также влияет неравномерное охлаждение, возникающее во время заполнения пресс-формы расплавом.

Для полостей средних размеров (25x50 мм), длинных ячеек (25x100 мм) и ячеек Ø 25 мм, минимальное остаточное давление наблюдается при  $\alpha=90^\circ$ ,  $\alpha=180^\circ$  и  $\alpha=180^\circ$  соответственно.

Результаты моделирования показывают, что остаточное давление  $P$  меняется в зависимости от направления моделируемого остаточного сечения среза, и в результате выбора рационального макрорельефа формообразующих поверхностей можно достигнуть понижения остаточного давления до 35 % (рисунок 2.19).

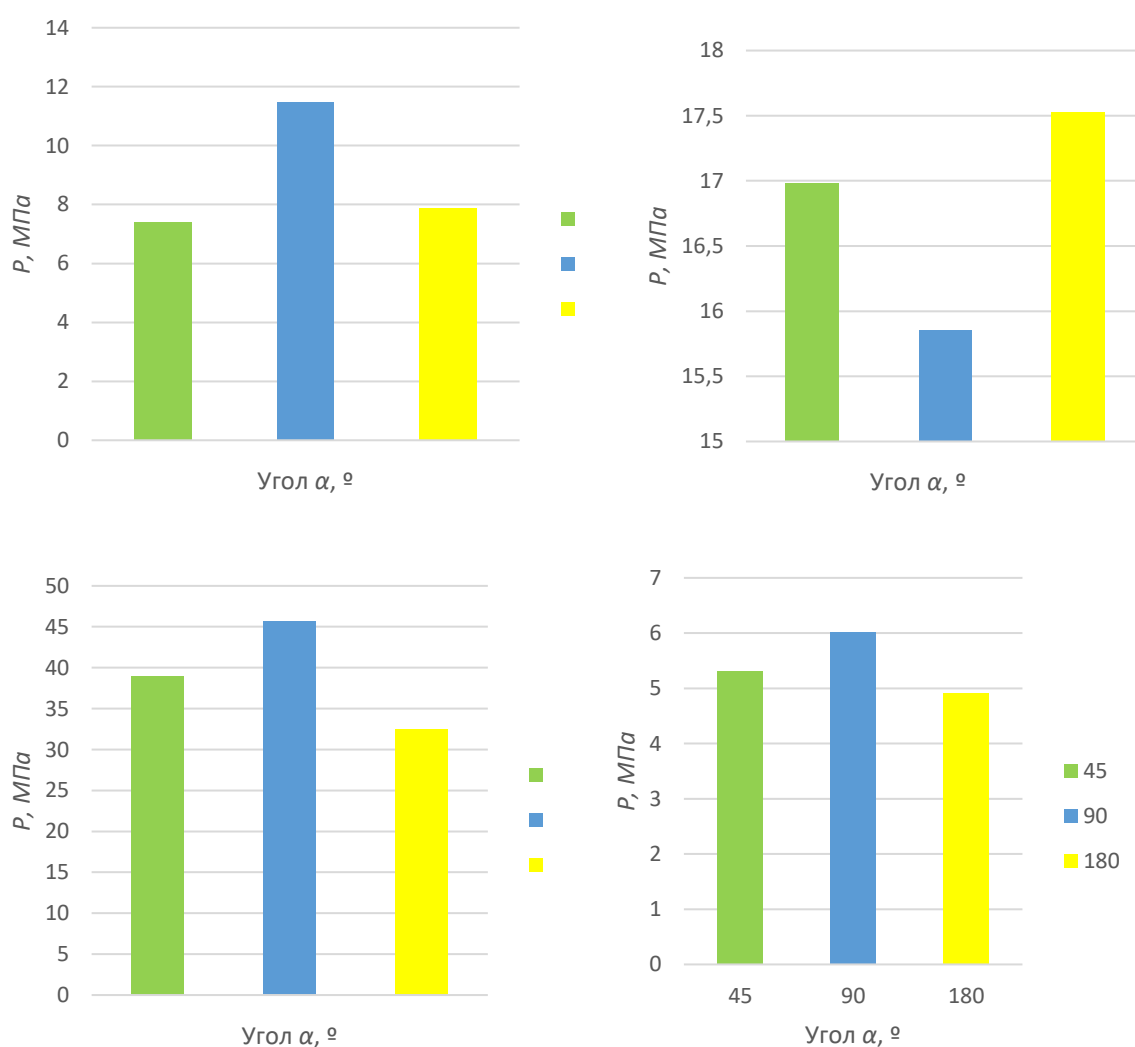
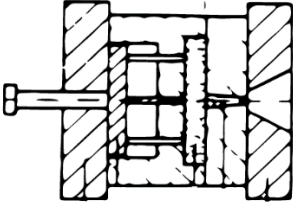
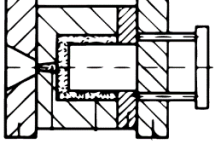
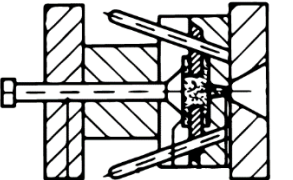
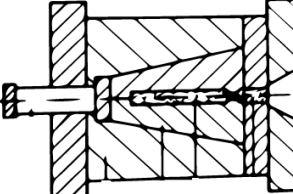
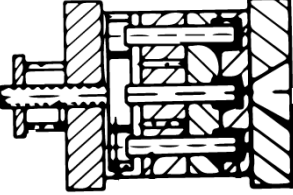
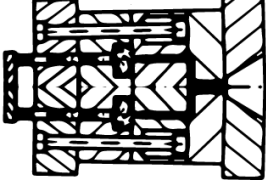


Рисунок 2.19 – Графики влияния выбора рационального направления траектории движения фрезы под углом  $\alpha$  по отношению к главному вектору движения расплава на остаточное давление  $P$



Процесс заполнения пресс-формы материалом ПКМ является многофакторным, поэтому математическое моделирование не может в полной степени отражать фактических значений параметров литья, так как технологические режимы также зависят от типа литейной машины и конструкций пресс-форм (таблица 2.7).

Таблица 2.7 – Особенности конструкций пресс-форм, влияющие на технологические режимы литья

Эскиз конструкции пресс-формы	Описание конструктивных элементов пресс-форм
	Стандартная конструкция пресс-формы с одной линией разъема, включающая в себя плиты крепления, систему выталкивания и формообразующие детали с литниковой системой
	Пресс-форма, включающая в себя плиты крепления, формообразующие детали с литниковой системой и систему выталкивания выполненную в виде плиты съема
	Пресс-форма, состоящая из плит крепления, формообразующих деталей с литниковой системой и подвижных частей пресс-формы,двигающихся по наклонным колонкам
	Пресс-форма, особенностью которой является система раздвижных полуматриц для извлечения отливки из формообразующей полости
	Пресс-форма, где для извлечения получаемых деталей используется механизм вывинчивания. Такой тип пресс-форм оснащен приводом, который приводит в движение зубчатое колесо и ходовой винт, с помощью которого извлекается отливка
	Конструкция пресс-формы с двумя линиями разъема. Дополнительная литниковая плита служит для отделения в автоматическом режиме литника от изготавливаемой детали за счет ее отдельного движения

Количество конструктивных элементов и сложность применяющихся формообразующих деталей влияют на равномерность и скорость времени охлаждения  $T_0$ . Рассмотрим такой параметр, который не будет зависеть от перечисленных факторов, влияющих на охлаждение, как  $T_3/2$  при  $\min T_3$ , момент времени заполнения, равный половине времени заполнения ячейки с наименьшим результатом  $\min T_3$ .

По получившимся результатам математического моделирования заметно что в случае простейшей ячейки малых размеров (25x25 мм), с углом  $\alpha=45^\circ$  в момент времени  $T_3/2$  при  $\min T_3$  заполнение достигает значения 54 %, тогда как при наихудшем результате при  $\alpha=90^\circ$  это значение останавливается на 28 %, а заполнение ячейки при  $\alpha=180^\circ$  устанавливается посередине этих значений. Аналогичные результаты наблюдаются при моделировании ячеек других размеров, где максимальное значение заполнения простейшей ячейки соответствует минимальному значению  $T_{\text{общ}}$  и в зависимости от вида ячейки заполняемость увеличивается до 50 %.

Согласно теории подобия и анализа размерностей, где все параметры и характеристики, векторные и скалярные, пропорциональны и подобны в соответствующих точках пространства и времени, данные результаты исследований можно применить к полостям других геометрически подобных размеров, которые характеризуются равенством всех подобных углов  $\alpha$ , пропорциональностью линейных геометрических размеров, а также пропорциональностью скоростей, ускорений, сил и напряжений. Определим значения коэффициентов подобия  $k_1, k_2, k_3, k_4$  для каждой простейшей полости (рисунок 2.20).

Таким образом, результаты математического моделирования формообразования макрорельефа на формообразующих поверхностях с различной траекторией фрезерования можно применить к размерам полостей с отношением сторон, равным коэффициентам подобия  $k_1, k_2, k_3, k_4$ .

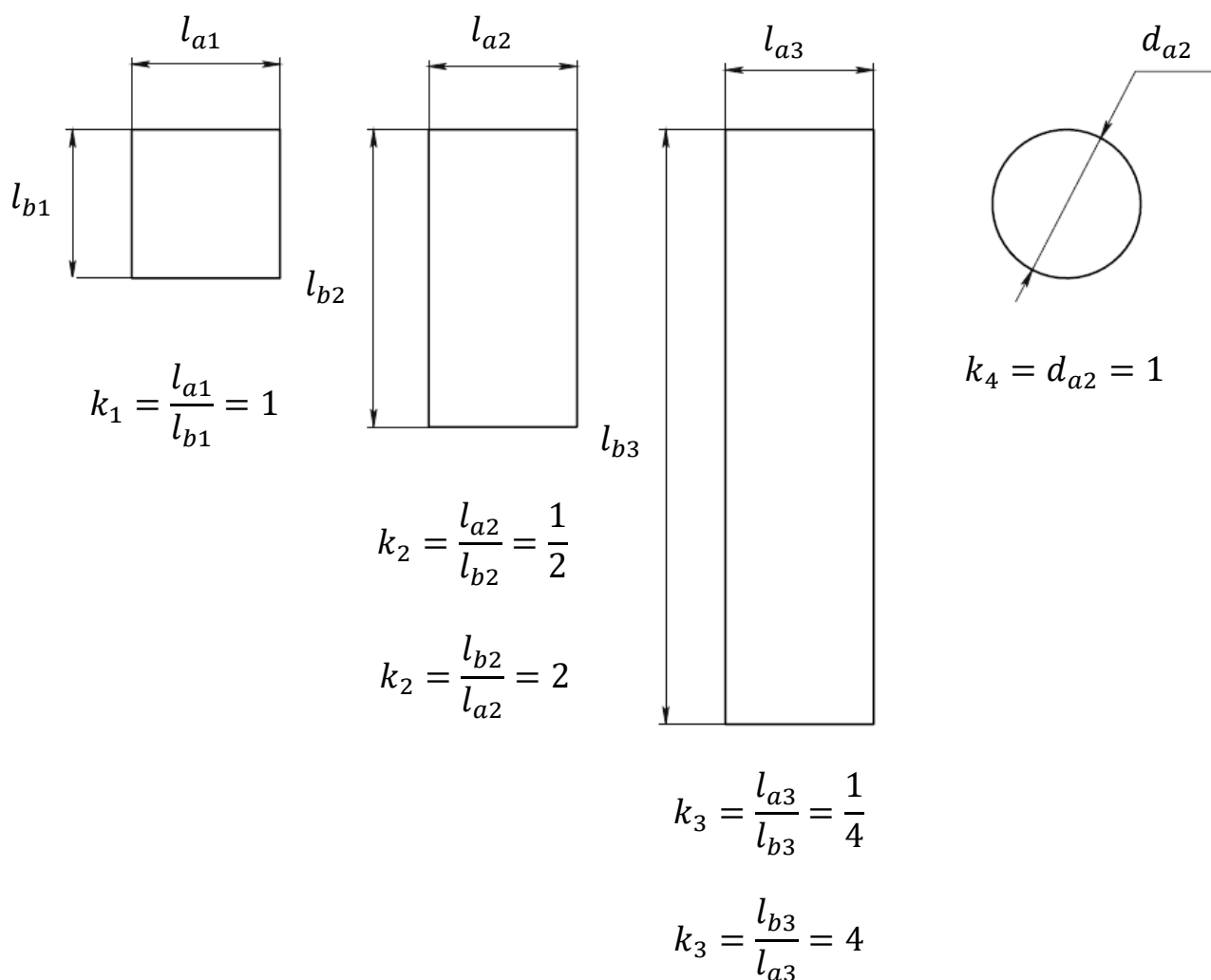


Рисунок 2.20 – Определение коэффициентов подобия для простейших полостей

Проведя анализ результатов моделирования и влияния направления макрорельефа на главные параметры технологии литья под давлением, расчетную скорость заполнения пресс-формы, значение и равномерность остаточного давления, и скорость охлаждения, сформулируем рекомендации выбора траектории фрезерования в зависимости от движения расплава в пресс-форме и геометрических параметров изготавливаемой детали, основанные на математическом моделировании (рисунок 2.21), выбирая ту траекторию, при которой общее время заполнения пресс-формы  $T_{\text{общ}}$  было наименьшим по результатам математического моделирования процесса заполнения формы.

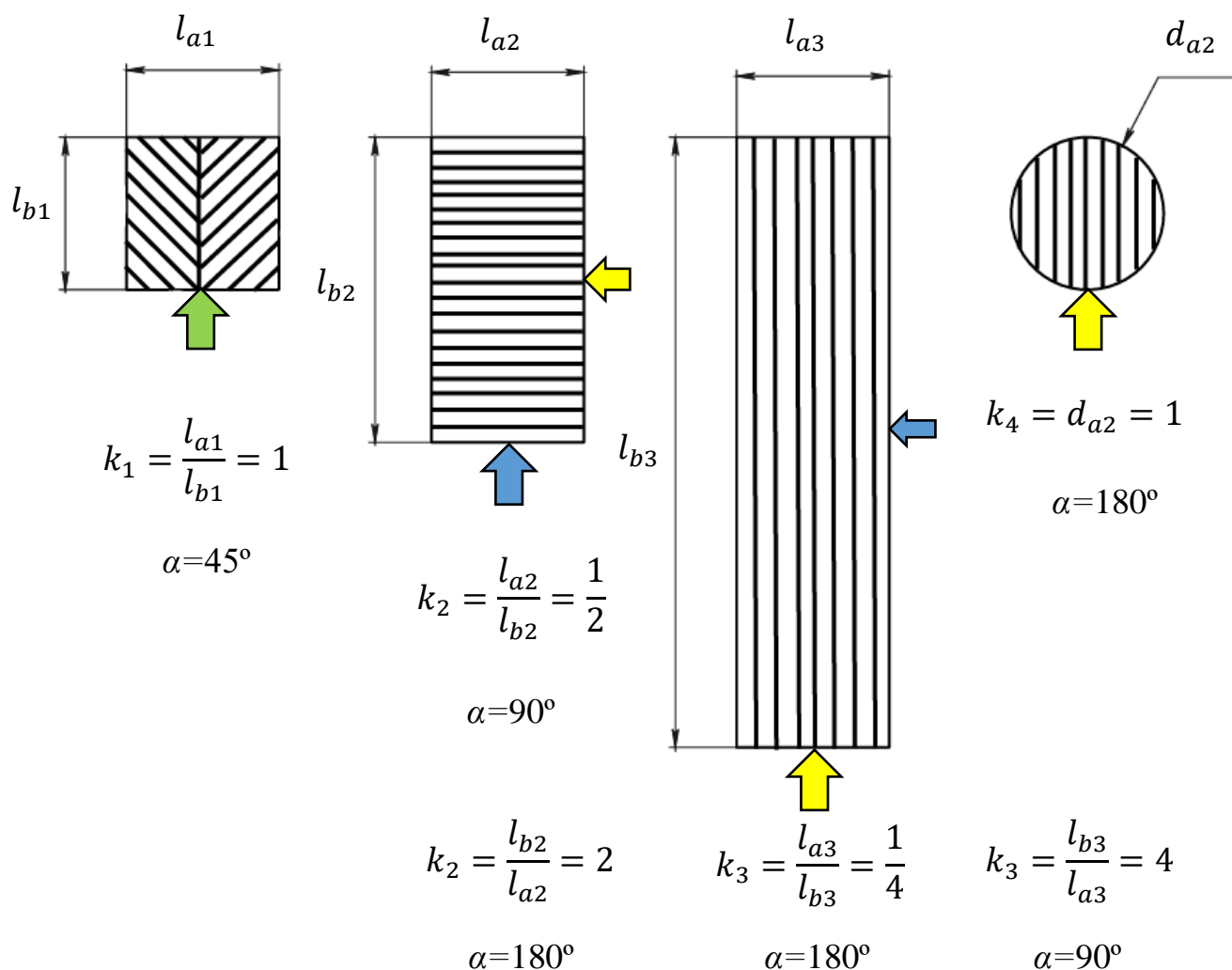


Рисунок 2.21 – Расчет коэффициентов подобия и рекомендации по выбору траектории фрезерования для программирования

Проанализировав все проведенные теоретические исследования, можно сформулировать следующие рекомендации: рациональным будет являться такой угол направления макрорельефа, при котором будет достигаться минимальное общее время заполнения пресс-формы  $T_{\text{общ}}$ , что обеспечивает минимальное значение и равномерность остаточного давления и скорость охлаждения. Рациональным углом  $\alpha$  для простейших прямоугольных поверхностей с коэффициентом подобия  $k \leq 0,25$  и  $2 \leq k < 4$  будет являться угол  $\alpha = 180^\circ$ , для поверхностей с коэффициентом подобия  $0,25 < k \leq 0,5$  и  $k \geq 4$  рациональный угол  $\alpha = 90^\circ$ , а для  $0,5 < k < 2$  –  $\alpha = 45^\circ$ . Для круглых поверхностей различного диаметра

рациональный угол  $\alpha=180^\circ$ . Стоит отметить, что расчёт коэффициентов подобия ведется относительно вектора течения расплава в точке инъекции, если изменить ее положение, изменится и соотношение сторон, а следовательно, значение коэффициента подобия, таким образом, на рисунке 2.21 желтым цветом указана точка инъекции при  $\alpha=180^\circ$ , а синим и зеленым – точка инъекции при  $\alpha=90^\circ$  и  $\alpha=45^\circ$  соответственно. Результаты проверены математическим моделированием и сведены в таблицу 2.8.

Таблица 2.8 – Коэффициент подобия в зависимости от размеров ячеек и выбор рационального угла для построения траектории фрезерования

<i>lb</i>	Длина ячейки <i>la</i>																			
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0
10	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
15	0,3	0,7	1,0	1,3	1,7	2,0	2,3	2,7	3,0	3,3	3,7	4,0	4,3	4,7	5,0	5,3	5,7	6,0	6,3	6,7
20	0,3	0,5	0,8	1,0	1,3	1,5	1,8	2,0	2,3	2,5	2,8	3,0	3,3	3,5	3,8	4,0	4,3	4,5	4,8	5,0
25	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0
30	0,2	0,3	0,5	0,7	0,8	1,0	1,2	1,3	1,5	1,7	1,8	2,0	2,2	2,3	2,5	2,7	2,8	3,0	3,2	3,3
35	0,1	0,3	0,4	0,6	0,7	0,9	1,0	1,1	1,3	1,4	1,6	1,7	1,9	2,0	2,1	2,3	2,4	2,6	2,7	2,9
40	0,1	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	1,9	2,0	2,1	2,3	2,4	2,5
45	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2
50	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
55	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,5	1,6	1,7	1,8
60	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
65	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4	1,5	1,5
70	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4
75	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2	1,3	1,3
80	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2	1,3
85	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	1,2
90	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1
95	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1
100	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0



- угол  $\alpha=45^\circ$



- угол  $\alpha=90^\circ$



- угол  $\alpha=180^\circ$

Впервые в результате математического моделирования получена зависимость построения траектории фрезерования в зависимости от геометрических параметров формообразующих поверхностей, по которым течет

ПКМ в пресс-формах. При исследовании различных схем моделирования фрезерования по траектории с различным углом по отношению к главному вектору течения расплава выявлено, что направление формируемого остаточного сечения среза – макрорельефа на формообразующих поверхностях – влияет на технологические параметры цикла литья. Получено подтверждение, что наибольшая скорость заполнения пресс-формы происходит при траектории фрезерования, направленной под рациональным углом к главному вектору течения расплава: угол  $\alpha=45^\circ$  для полостей с коэффициентом подобия  $0,5 < k < 2$ , угол  $\alpha=90^\circ$  для полостей с коэффициентом подобия  $0,25 < k \leq 0,5$  и  $k \geq 4$  и угол  $\alpha=180^\circ$  для полостей с коэффициентом подобия  $k \leq 0,25$  и  $2 \leq k < 4$  и для круглых формообразующих поверхностей. При моделировании получены результаты снижения остаточного давления до 35 %, скорости охлаждения до 30 % и увеличение заполняемости в течении технологического цикла литья до 25 %.

Данные рекомендации для фрезерования формообразующих поверхностей деталей пресс-форм позволяют повысить производительность технологического цикла литья до 25 % и понизить остаточное давление до 35 %.

Выдвигается гипотеза, что при использовании новой технологии направленного формообразования макрорельефа (ТНФМ) обеспечиваются необходимые параметры технологического цикла литья и требуемое качество поверхности. В результате уменьшения сопротивления движению материала, так как ему не требуется преодолевать неровности на поверхности полости, заполнение пресс-формы происходит равномерно и за меньшее время. Это уменьшает износ, увеличивает износостойкость формообразующих поверхностей, а значит повышает долговечность пресс-форм.

Однако результаты моделирования необходимо проверить путем экспериментальных исследований влияния направления и высоты макрорельефа на износостойкость, производительность технологического цикла литья и качество изготавливаемых деталей.

## 2.5 Выводы по второй главе

1. Выделены полости различных размеров, для каждой полости проведено математическое моделирование процесса литья с формообразованием остаточного сечения среза – макрорельефа на формообразующих поверхностях – с различными углами  $\alpha$  от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ . При использовании автоматизированного программного комплекса SolidWorks Plastics определен главный вектор ( $\bar{R}$ ) течения расплава в процессе литья под давлением детали из ПКМ.

2. Результаты моделирования показывают, что общее время технологического цикла литья  $T_{\text{общ}}$  изменяет свое значение в зависимости от направления траектории движения фрезы, и в зависимости от типа полости производительность технологического цикла литья увеличивается до 25 %.

3. Установлено, что остаточное давление  $P$  меняется в зависимости от направления моделируемого макрорельефа, и в результате выбора рационального макрорельефа формообразующих поверхностей можно достигнуть понижения остаточного давления до 35 %.

4. Установлено, что с направлением макрорельефа под углом  $\alpha=45^\circ$  и  $\alpha=180^\circ$  охлаждение происходит равномерно, однако в случае угла  $\alpha=180^\circ$  требуется больше времени  $T_0$ , при моделировании полости с углом  $\alpha=90^\circ$  наблюдается неравномерный характер охлаждения, что недопустимо при формировании изделий из ПКМ в пресс-формах.

5. Установлены оптимальные схемы фрезерования полостей с различной длиной и шириной, учитывая коэффициент подобия. Выделенные оптимальные схемы фрезерования имеют такие наилучшие параметры процесса литья, как время заполнения пресс-формы, значение и равномерность остаточного давления в процессе технологического цикла, и скорость охлаждения.

6. Проведенные исследования позволили разработать технологические рекомендации по выбору траектории фрезерования для программирования на основе выбора угла  $\alpha$  с учетом геометрических параметров изготавливаемой детали.

### **Глава 3. Разработка методического обеспечения проведения экспериментальных исследований влияния направленного формирования макрорельефа на формообразующих поверхностях при фрезеровании на износостойкость пресс-форм**

Теоретические и практические исследования в области влияния макрорельефа формообразующих поверхностей пресс-форм на износостойкость формообразующей оснастки и качество получаемых изделий не проводились. Таким образом, разработка технологического обеспечения в виде методологии проведения соответствующих экспериментальных исследований в сфере направленного формирования макрорельефа является важной научной и производственной задачей.

#### **3.1 Выбор материалов и образцов для экспериментальных исследований**

В целях подтверждения выводов, полученных во второй главе, и определения зависимостей необходимо провести экспериментальные исследования. Для изготовления формообразующих деталей пресс-форм применяют такие наиболее распространенные материалы, как коррозионно-стойкая жаропрочная сталь 40X13 или конструкционная легированная сталь 38ХНМ, прошедшие термообработку и закалку, поэтому для проведения экспериментальных исследований были выбраны данные стали. Химический состав и механические свойства материалов 40X13 и 38ХНМ показаны в таблицах 3.1 и 3.2.

Для обеспечения высокого качества и точности формообразующие детали перед операциями чистового фрезерования подвергают термической обработке, закалке и последующему отпуску, в результате получаемой повышенной твердости накладываются высокие требования к выбору оборудования и обрабатываемого инструмента.

При подготовке экспериментальных исследований определения функциональной связи шероховатости обрабатываемой поверхности в



зависимости от назначаемых режимов фрезерования, а также величины макрорельефа в зависимости от параметров поверхности и параметров фрезерования определены образцы заготовок (рисунок 3.1).

Таблица 3.1 – Химический состав исследуемых материалов, применяющихся для изготовления литевых пресс-форм

Химический состав материала 40X13								
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr		
0,35–0,44	До 0.6	До 0.6	До 0.6	До 0,025	До 0,03	12–14		
Химический состав материала 38ХНМ								
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	Cu
0,33–0,43	0,17–0,37	0,75–1,05	0,4–0,7	До 0.04	До 0.045	0,4–0,7	До 0.3	До 0.3

Таблица 3.2 – Механические свойства исследуемых материалов применяющихся для изготовления литевых пресс-форм

Параметр	38ХНМ	40X13
Твердость	45...50 HRC	53...55 HRC
Предел прочности, $\sigma_B$	750 МПа	1650 МПа
Предел пропорциональности, $\sigma_T$	550 МПа	1150 МПа
Ударная вязкость, КСЧ	500 кДж/м <sup>2</sup>	110 кДж/м <sup>2</sup>

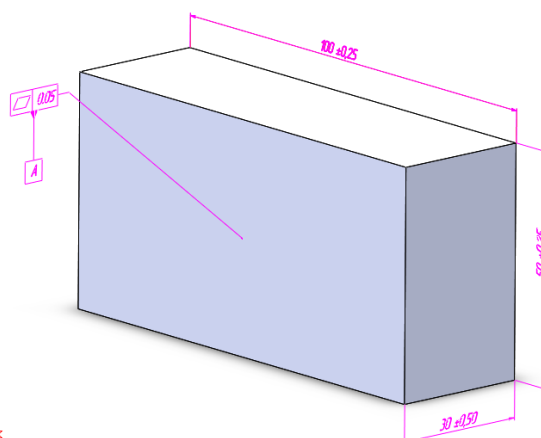


Рисунок 3.1 – 3D-модель образца для проведения экспериментальных исследований

Характеристики выбранных образцов соответствуют типовым заготовкам для изготовления формообразующих деталей пресс-форм, таких как матрицы, пуансоны, вставки, шиберы и прочие формообразующие элементы. При проведении экспериментальных исследований полученные функциональные связи будут использованы для проведения экспериментальных исследований при обработке деталей пресс-форм.

Для проведения экспериментальных исследований обработки деталей пресс-форм выбраны формообразующие детали 38 пресс-форм, пример заготовки формообразующей детали пресс-формы размером 680x300x90 мм представлен на рисунке 3.2.

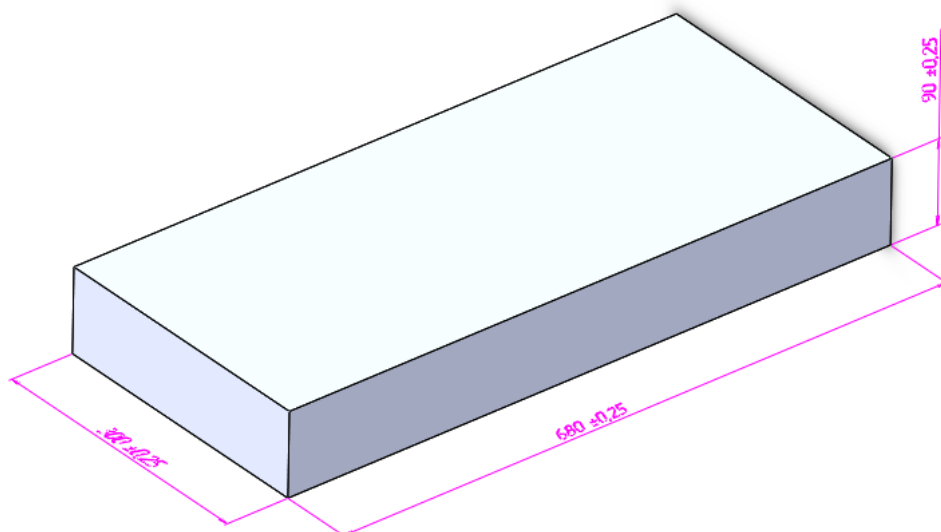


Рисунок 3.2 – 3D-модель заготовки детали литевой пресс-формы

При проведении экспериментальных исследований определения влияния траектории фрезерования на формирование макрорельефа формообразующих поверхностей и влияния макрорельефа на износостойкость формообразующих деталей использовались детали пресс-форм для изготовления различных видов деталей из ПКМ. В частности, пуансон детали «Накладка», в которой обрабатывались формообразующие поверхности (рисунок 3.3).

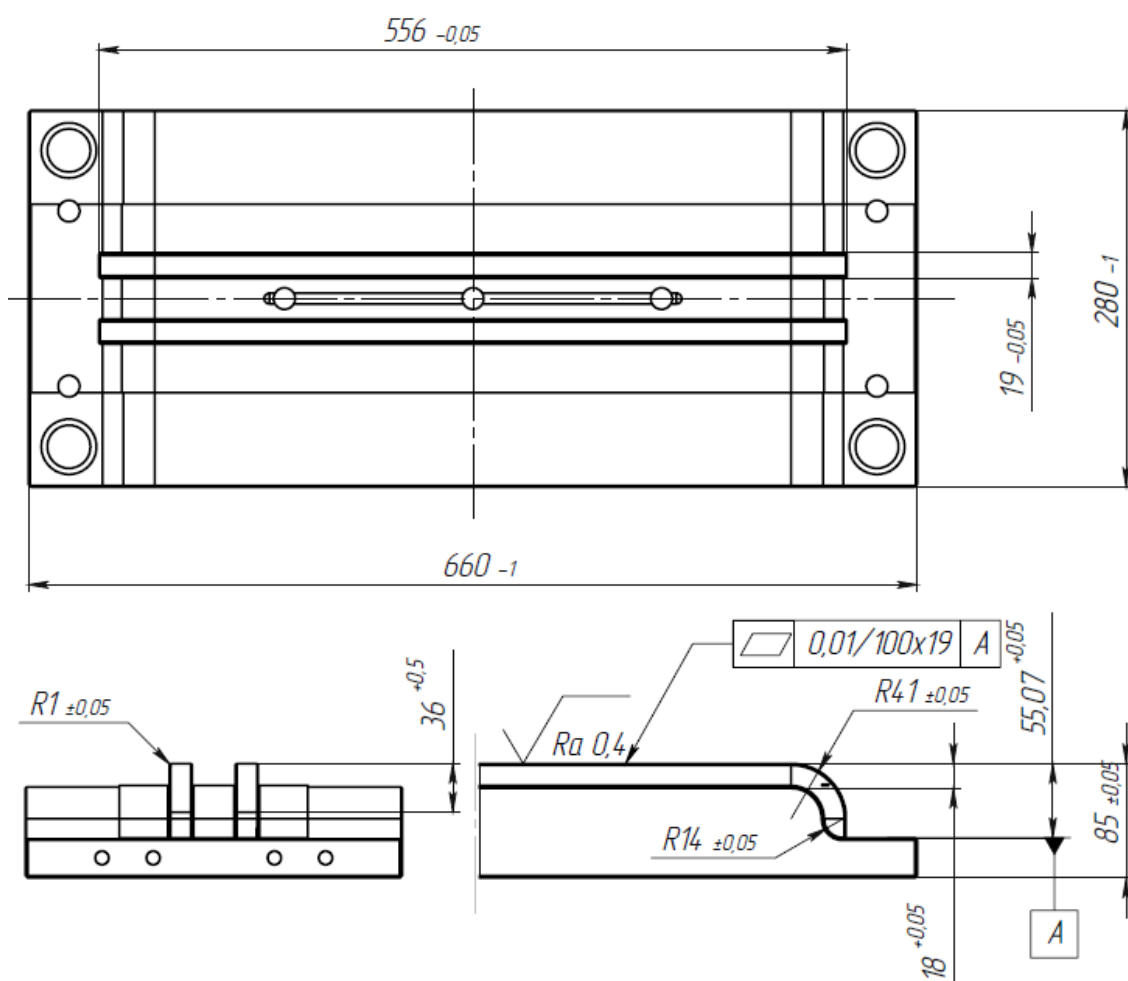


Рисунок 3.3 – Эскиз формообразующего пуансона пресс-формы «Накладка»

Стандартные технологии обработки не обеспечивают требуемой износостойкости и качества поверхности вследствие геометрических характеристик детали из ПКМ (рисунок 3.4), отливаемой в пресс-форме, большой площади поверхности соприкосновения расплава с формообразующими поверхностями деталей и повышенных требований по отклонению от плоскостности и шероховатости, поэтому требуется применение новых методов управления фрезерованием.

Выбранные материалы для экспериментальных исследований функциональной связи шероховатости обрабатываемой поверхности в зависимости от назначаемых режимов фрезерования и функциональной связи величины макрорельефа в зависимости от параметров поверхности и параметров фрезерования наиболее часто применяются для изготовления формообразующих

деталей пресс-форм благодаря их механическим и эксплуатационным свойствам. Такие материалы являются коррозионно-стойкими, их размеры практически не изменяются после термообработки, и они имеют высокую степень обрабатываемости.

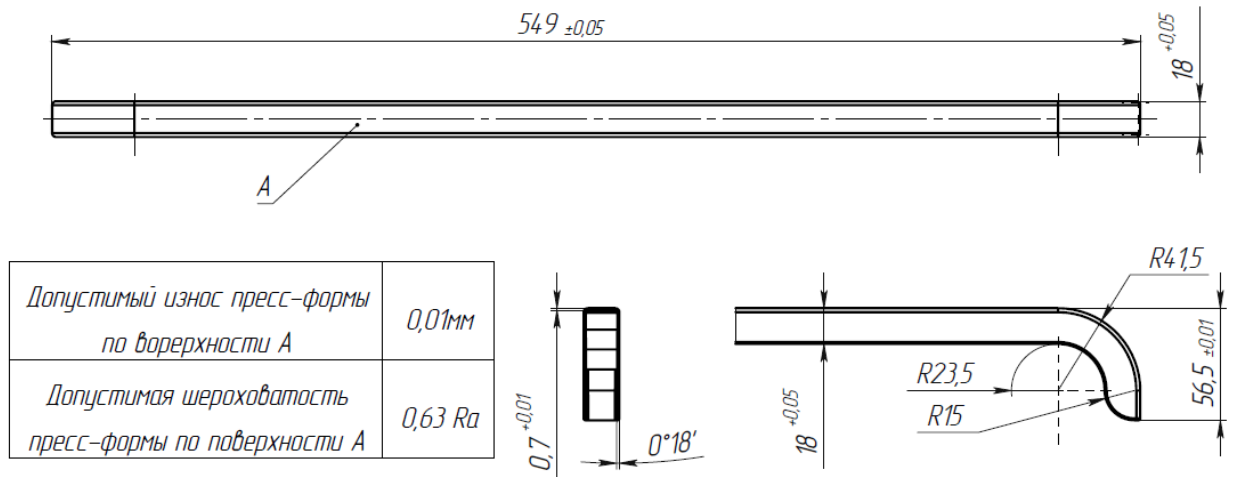


Рисунок 3.4 – Эскиз литейной детали из ПКМ «Накладка»

Для примера формообразующей детали приведена одна из 38 рассмотренных литевых деталей из ПКМ. Геометрические размеры формообразующего пуансона литевой пресс-формы детали «Накладка» иллюстрируют рассмотренные геометрические параметры полостей для формирования рационального макрорельефа.

### 3.2 Выбор оборудования, инструмента и программное обеспечение экспериментальных исследований

При формировании направленного макрорельефа каждой формообразующей поверхности задается индивидуальная траектория движения обрабатывающего инструмента, а для смежных поверхностей необходим плавный переход из одной траектории в другую. На универсальном оборудовании применение метода направленного формирования макрорельефа невозможно, так как кинематика не

позволит создать необходимое направление макрорельефа на поверхности детали, однако оборудование с ЧПУ успешно решает эту проблему.

Для экспериментальных исследований определения функциональной связи шероховатости обрабатываемой поверхности в зависимости от назначаемых режимов фрезерования, а также определения функциональной связи величины макрорельефа в зависимости от параметров поверхности и параметров фрезерования выбран вертикально-фрезерный обрабатывающий центр Haas VF-3, а для экспериментальных исследований обработки деталей пресс-форм был использован высокопроизводительный обрабатывающий центр Haas VM-6.

Вертикальный обрабатывающий центр Haas VF-3 (рисунок 3.5) предназначен для обработки заготовок среднего размера, полностью литая чугунная станина, стальные закаленные подшипниковые блоки направляющих, а также шарико-винтовая передача с двойным креплением и автоматической подачей охлаждающей жидкости позволяют обеспечить необходимые параметры для экспериментальных исследований.



Рисунок 3.5 – Вертикально-фрезерный обрабатывающий центр Haas VF-3

Габаритные размеры стола 1016x508x635 мм, карусельное устройство смены инструмента на 20 гнезд, ускоренное перемещение 25,4 м/мин, система подачи СОЖ, серводвигатели перемещений по осям с прямой передачей момента и максимальная частота вращения шпинделя (таблица 3.3) расширяют возможности применения станка, на этом станке будем проводить экспериментальные исследования по определению функциональной связи шероховатости обрабатываемой поверхности в зависимости от назначаемых режимов фрезерования, а также величины макрорельефа в зависимости от параметров поверхности и параметров фрезерования

Таблица 3.3 – Технические характеристики Haas VF-3

Параметр	Значение
Макс. перемещение по оси X, мм	1016
Макс. перемещение по оси Y, мм	508
Макс. перемещение по оси Z, мм	635
Макс. нагрузка на стол (равно-распределенная), кг	1588
Максимальная частота вращения шпинделя, об/мин	8100
Макс. мощность шпинделя, кВт	22,4
Повторяемость, мм	$\pm 0,0025$

Вертикальный обрабатывающий центр Haas VM-6 (рисунок 3.6) предназначен для изготовления деталей пресс-форм и штампов. На данном станке проводятся как черновые операции фрезерования, благодаря высокой жесткости технологической системы, так и финишное фрезерование.

Такие многофункциональные вертикальные обрабатывающие центры используются предприятиями изготовителями пресс-форм для изготовления формообразующих деталей пресс-форм. Их использование позволяет достичь необходимой точности и параметров качества в процессе фрезерной обработки формообразующих поверхностей.



Рисунок 3.6 – Вертикально-фрезерный обрабатывающий центр Haas VM-6

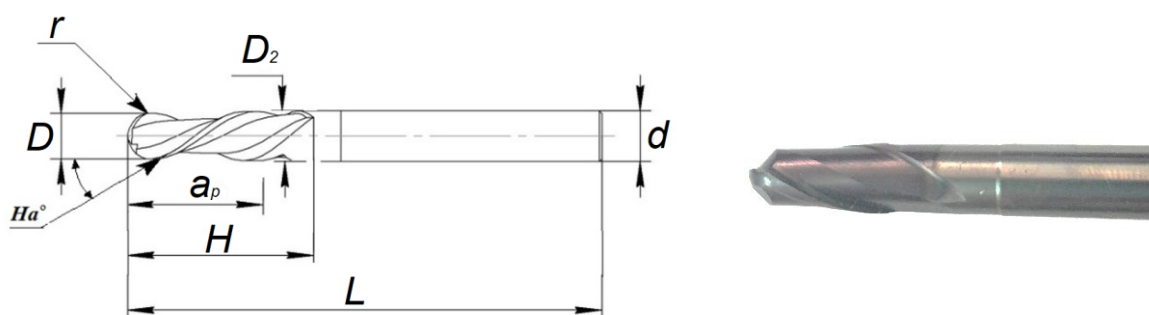
Рабочая зона 1626 x 813 x 762 мм, устройство смены инструмента бокового исполнения на 25 гнезд, высокая точность, ускоренное перемещение 15,2 м/мин и максимальная частота вращения шпинделя (таблица 3.4) позволяет сократить время обработки формообразующих деталей пресс-форм и обеспечить необходимую жесткость технологической системы и точность исполнения размеров.

Таблица 3.4 – Технические характеристики Haas VM-6

Параметр	Значение
Макс. перемещение по оси X, мм	1626
Макс. перемещение по оси Y, мм	813
Макс. перемещение по оси Z, мм	762
Макс. нагрузка на стол (равно-распределенная), кг	1814
Максимальная частота вращения шпинделя, об/мин	12000
Макс. мощность шпинделя, кВт	22,4
Повторяемость, мм	±0,0025

Характеристики выбранного оборудования подходят для экспериментальных исследований, так как возможности станков могут обеспечить необходимые режимы резания, а размеры образцов и выбранных деталей пресс-форм не выходят за рамки рабочей зоны.

Для выбора геометрии и материала инструмента предприятием и производителями инструмента проведены предварительные исследования по финишному фрезерованию деталей пресс-форм. Испытывался инструмент разных производителей, таких как Mitsubishi, Ford, Sandvik, в результате наилучшие результаты при фрезеровании формообразующих деталей пресс-форм получены при использовании цельных твердосплавных фрез. Был выбран ряд фрез одной из которых являлась цельная твердосплавная фреза Iscar SolidMill EB-A2 с углом подъема спирали  $30^\circ$  для обработки материалов твердостью до 65 HRC (рисунок 3.7).



Обозначение	$D$ , мм	$r$ , мм	$d$ , мм	$a_p$ , мм	$L$ , мм	$H$ , мм	$D_2$ , мм	Число зубьев	$H_a$ , °	Хвостовик
EB-A2 06-12/22C06M80	6	3	6	12	80	22	5,8	2	30	Цилиндрический

Рисунок 3.7 – Геометрические параметры фрезы Iscar SolidMill EB-A2

Диаметры фрез выбраны исходя из анализа формообразующих поверхностей и выявленной величины минимального скругления. Такие фрезы предназначены для чистовой обработки, имеют передний угол  $\gamma=15^\circ$  и задний угол  $\alpha=20^\circ$ . Материалом режущей части является вольфрамкобальтовый сплав IC903 с 12 % кобальта и покрытием TiAlN PVD, фрезы отлично подходят для фрезерования на



высоких скоростях резания и средних подачах с охлаждением воздухом. Для зажима инструмента в станке использовался патрон с конусом морзе 40 TC40H70ER32AD-B и цанга ER32 (рисунок 3.8).

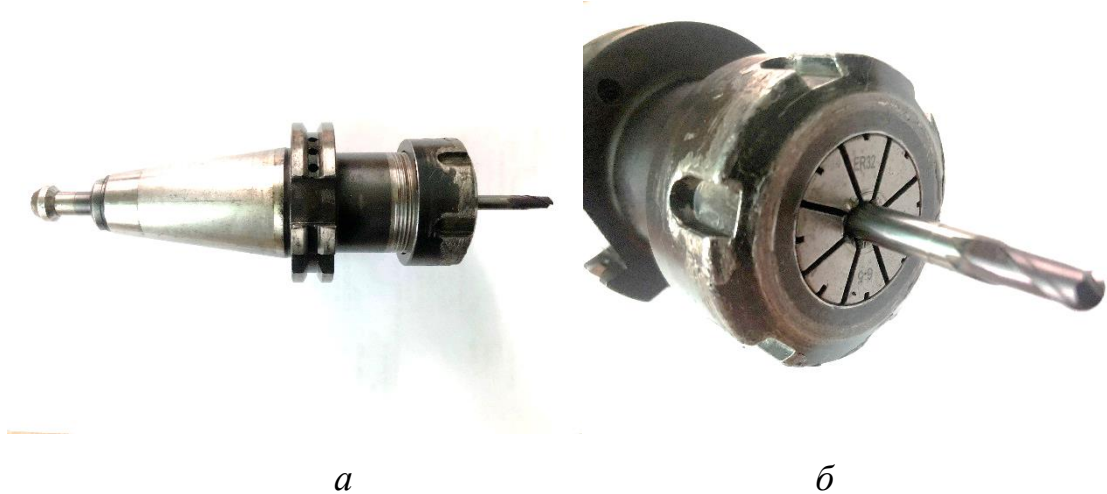


Рисунок 3.8 – Патрон TC40H70ER32AD-B (а) и цанга ER32 (б)

Для изготовления пресс-форм разработана специальная программа на станок с ЧПУ, составленная по траектории фрезерования, выбранная на основе математического моделирования направления главного вектора течения расплава, который, в свою очередь, определяется CAE-моделированием в программном комплексе SolidWorks в каждой из простейших полостей, на которые разделена деталь.

Каждой поверхности простейшей полости назначается траектория фрезерования и проецируется на формообразующие поверхности детали пресс-формы, а затем назначаются режимы резания исходя из требований по шероховатости.

Внедрение метода направленного формирования макрорельефа осложняется применением различных траекторий фрезерования на формообразующих поверхностях. Составление управляющей программы для станка с ЧПУ проводилось в системе подготовки управляющих программ (CAM) Unigraphics NX. Применение САМ-систем позволяет обрабатывать каждую поверхность по своей

траектории и упрощает процесс внедрения метода в технологический процесс путем замены программы для обработки формообразующих поверхностей.

Пример управляющей программы представлен в Приложении 1.

### **3.3 Разработка методики проведения измерений шероховатости, износа и производительности технологического цикла литья**

В процессе экспериментальных исследований определения функциональной связи шероховатости обрабатываемой поверхности в зависимости от назначаемых режимов фрезерования, определения функциональной связи величины макрорельефа в зависимости от параметров поверхности и параметров фрезерования деталей пресс-форм контролируется параметр шероховатости поверхности  $R_a$  с помощью профилометра TR210 (рисунок 3.9). Профилометр предназначен для измерения параметров шероховатости на формообразующих поверхностях, отверстий, плоских и криволинейных поверхностей. Характеристики используемого профилометра представлены в таблице 3.5.



Рисунок 3.9 – Комплект профилометра TR210 для измерения шероховатости

На поверхности располагается датчик с алмазной иглой, который посредством перемещения щупа в основании прибора получает информацию о

неровности поверхности. Возникающие в процессе измерения колебания щупа преобразуются в напряжения, соответствующие этим колебаниям, которые усиливаются в микропроцессоре. К измерениям применяется фильтр Гаусса, и результаты выводятся на дисплей.

Таблица 3.5 – Характеристики профилометра TR210

Параметр	Значение
Диапазон измерения Ra	0,005 – 16
Диапазон измерения Rz	0,02 – 160
Типы фильтров	Гаусс
Отсечка шага $\lambda_c$ , мм	0,25; 0,8; 2,5
Длина оценки, мм	(1-5) $\lambda_c$
Измерительное усилие, $H$	0,004
Длина перемещения щупа, мм	18
Предел допускаемой основной относительной погрешности прибора по параметру Ra, %	10

В процессе исследования влияния траектории фрезерования на формирование макрорельефа при экспериментальных исследованиях обработки деталей пресс-форм контролируется износ формообразующей поверхности и производительность технологического цикла литья. Замеры износа формообразующей поверхности производился на цифровом микроскопе DigiMicro, а производительность цикла литья замерялась на термопластавтоматах CUN, выбранных в зависимости от габаритных размеров пресс-формы.

Цифровой микроскоп SMARTZOOM 5 (рисунок 3.10) с коаксиальной подсветкой и пространственным разрешением 0,56 мкм позволяет измерить износ на формообразующих деталях пресс-форм с возможностью передавать на компьютер полученные снимки.

Измерение износа проводится на формообразующих поверхностях пресс-форм, пуансона или матрицы и сопоставляется с допустимым износом формообразующей поверхности по чертежу.

Следует отметить, что в стандартной комплектации микроскопа на сложных криволинейных поверхностях чаще всего сложно измерить износ литевых деталей пресс-форм. Для измерения сложнодоступных поверхностей используется специальная оснастка для расположения микроскопа удобным образом.



Рисунок 3.10 – Микроскоп SMARTZOOM 5 для измерения износа литевых деталей пресс-форм

В процессе экспериментальных исследований определения функциональной связи величины времени заполнения полостей в зависимости от параметров поверхности для измерений использовались термопластавтоматы для литья под давлением CUN (рисунок 3.11). В зависимости от габаритных размеров пресс-форм, а также объема и веса отливаемой детали выбирался необходимый станок термопластавтомат (таблица 3.6).



Рисунок 3.11 – Термопластавтоматы CUN для литья деталей из ПКМ под давлением

Замер времени заполнения полостей и производительности проводится на термопластавтомате с помощью встроенного программного обеспечения во время технологического цикла литья, замеряется общее время цикла  $T_{\text{общ}}$  во время получения отливки (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Выбор термопластавтомата в зависимости от габаритных размеров пресс-формы, объема и веса отливаемой детали

Термопластавтомат	Мин/Макс размер пресс-формы, мм	Объем впрыска, см <sup>3</sup>	Вес впрыска, г
Cybertech CUN-110	110/400	162	145
Cybertech CUN-150	110/485	270	243
Cybertech CUN-250	150/675	612	550
Cybertech CUN-360	200/765	962	886
Cybertech CUN-420	200/865	1479	1331
Cybertech CUN-650	250/1175	3119	2807
Cybertech CUN-800	300/1210	3770	3393

### 3.4 Планирование экспериментальных исследований

В литературе приводятся рекомендации по фрезерованию закаленных материалов, подходящих для производства пресс-форм для литья под давлением. Однако эти данные неполны, а рекомендуемые режимы фрезерования часто противоречивы. Значительные расхождения в величинах, рекомендуемой скорости, подачи и глубины резания могут быть объяснены тем, что эксперименты проводились отдельными исследователями при различных условиях обработки и неодинаковом износе инструмента.

В связи с этим устанавливалась функциональная связь шероховатости обрабатываемой поверхности в зависимости от назначаемых режимов фрезерования формообразующих поверхностей из закаленных сталей 38ХНМ и 40Х13, что позволит более обоснованно назначать скорость резания, подачу и глубину резания при обработке формообразующих поверхностей пресс-форм [166].

Скорость резания вычисляется по формуле, записанной в виде:

$$v = \frac{\pi D n}{1000} \text{ (м/мин)}, \quad (3.1)$$

где  $n$  – частота вращения фрезы (об/мин);

$D$  – диаметр фрезы (мм).

Подача при фрезеровании может рассчитываться на зуб, на оборот или минутную подачу. Подача на зуб  $S_z$  – это расстояние, на которое перемещается фреза за время поворота на угол между двумя соседними зубьями. Подача на оборот  $S_o$  – это расстояние, на которое фреза перемещается за время полного оборота. Минутная подача  $S_m$  – это расстояние, на которое перемещается фреза в процессе резания за 1 мин.

$$S_o = S_z Z \text{ (мм)}, \quad (3.2)$$

где  $Z$  – количество зубьев фрезы.

$$S_m = S_o n \text{ или } S_m = S_z Z n \text{ (мм/мин)}. \quad (3.3)$$

Глубина фрезерования, или толщина срезаемого слоя — это расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями, обозначается  $t$  и измеряется в мм.

Для нахождения зависимости величины шероховатости от режимов фрезерования  $Ra = f(V, S_o, t)$  сталей 38ХНМ и 40Х13 на фрезерном станке с ЧПУ НААС VF-6 глубина резания –  $t$ , скорость резания –  $V$  и подача на оборот –  $S_o$  были приняты в качестве независимых переменных. Таким образом, выделив определяющие параметры фрезерования, которые могут влиять на величину шероховатости можем записать степенную функцию в виде:

$$Ra = C_i V^k S_M^l t^m. \quad (3.4)$$

Факторный план  $2^3$  позволяет оценить восемь коэффициентов регрессии  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}$  и  $b_{123}$  [66]. При проведении полного факторного эксперимента производится смешанная оценка, что следует исходя из неразличимости столбцов  $x_0$  и  $x_{12}, x_{22}, x_{33}$  по значениям которых нельзя однозначно утверждать, что оценивает величина  $b_0$ , так как она имеет в уравнении значение свободного члена. Таким образом, величина  $b_0$  имеет в своем уравнении свободный член и вклады квадратичных членов:

$$b_0 \rightarrow \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_{ii}. \quad (3.5)$$

Относительно высокие значения вариации показателей, которые обычно имеют место в испытаниях, создают дополнительные трудности в планировании эксперимента, увеличивают объем необходимых испытаний. Для исключения влияния изменений условий эксперимента, которые могут происходить в течение его проведения в результате систематических ошибок или неконтролируемых факторов, необходимо рандомизировать опыты [24; 41; 44; 106; 107; 129].

При проведении экспериментального исследования установления функциональной связи шероховатости обрабатываемой поверхности в зависимости от назначаемых режимов фрезерования формообразующих поверхностей из закаленных сталей 38ХНМ и 40Х13 фрезами со сферическим





Аналогично, для нахождения зависимости высоты макрорельефа  $R$  от параметров поверхности и параметров фрезерования  $R = f(\rho, \Delta S, R_{фр})$  на фрезерном станке с ЧПУ HAAS VF-3 кривизна обрабатываемой поверхности –  $\rho$ , шаг поперечной подачи (шаг строчки) –  $\Delta S$  и радиус обрабатывающего инструмента –  $R_{фр}$  были приняты в качестве независимых переменных. Таким образом, выделив определяющие параметры по представленной формуле 2.19, можем записать степенную функцию в виде:

$$R = C_i \rho^k \Delta S^l R_{фр}^m. \quad (3.7)$$

Исходя из проанализированных геометрических параметров пресс-форм и рекомендуемых значений параметров фрезерования, запишем уровни факторов и интервалы варьирования (таблица 3.9).

Таблица 3.9 – Уровни факторов и интервалы варьирования

Уровень факторов	$\rho$ , мм		$\Delta S$ , мм		$R_{фр}$ , мм	
	$x_1$	$\ln x_1$	$x_2$	$\ln x_2$	$x_3$	$\ln x_3$
Верхний (+1)	100	4,6	0,5	-0,69	4	1,38
Нижний (-1)	8	2,07	0,1	-2,3	2	0,69
Нулевой (0)	54		0,3		3	
Интервал варьирования	46		0,2		1	

Также, для нахождения зависимости величины времени заполнения  $T_3$  от параметров поверхности  $T_3 = f(\alpha, R, Ra)$  на термопластавтоматах CUN угол направления макрорельефа –  $\alpha$ , высота макрорельефа –  $R$  и величина шероховатости –  $Ra$  были приняты в качестве независимых переменных. Данную зависимость требуется найти для каждого коэффициента подобия, так как при различных геометрических параметрах характер движения в полости будет изменяться. Выделив определяющие параметры, можем записать степенную функцию в виде:

$$T_3 = C_i \alpha^k R^l Ra^m. \quad (3.8)$$

Исходя из проанализированных данных представленных на рисунке 2.21 и требований, предъявляемых к формообразующим поверхностям пресс-форм, запишем уровни факторов и интервалы варьирования (таблица 3.10).

Таблица 3.10 – Уровни факторов и интервалы варьирования

Уровень факторов	$\alpha$ , °		$R$ , мм		$R_a$ , мкм	
	$x_1$	$\ln x_1$	$x_2$	$\ln x_2$	$x_3$	$\ln x_3$
Верхний (+1)	180	5,19	0,05	-2,99	0,6	-0,51
Нижний (-1)	90	4,49	0,0004	-7,82	0,4	-0,91
Нулевой (0)	135		0,0252		0,5	
Интервал варьирования	45		0,0212		0,1	

Для повышения точности проведения эксперимента в каждой точке проводим три опыта, впоследствии отбрасывая один результат и записывая среднее значение оставшихся откликов.

Полученные данные в результате экспериментальных исследований используем для проведения регрессионного анализа и получения эмпирической математической модели. Адекватность и достоверность полученной эмпирической математической модели подтверждаем по  $t$ -критерию Стьюдента,  $G$ -критерию Кохрена и  $F$ -критерию Фишера.

### 3.5 Выводы по третьей главе

1. Выбраны материалы и образцы для проведения экспериментальных исследований. Выбраны 38 деталей из ПКМ для которых в процессе изготовления пресс-форм будут обработаны формообразующие детали.

2. Подобрано требуемое оборудование, инструмент и программное обеспечение для экспериментальных исследований.

3. Разработана методика проведения измерений шероховатости, износа и производительности технологического цикла литья.

4. Записаны степенные функции, определены уровни факторов и интервалы варьирования, составлена матрица планирования для определения функциональных зависимостей.

## Глава 4. Результаты экспериментальных исследований влияния применения рациональной траектории фрезерования на качество и износостойкость пресс-форм

### 4.1 Результаты экспериментальных исследований по установлению функциональных взаимосвязей

На основе методики проведения экспериментальных исследований определения функциональной связи шероховатости обрабатываемой поверхности в зависимости от назначаемых режимов фрезерования формообразующих поверхностей стали 40X13 проведено 48 экспериментов. Для минимизации влияния случайных параметров в процессе фрезерования один из результатов был отброшен. Результаты шероховатости обработанной поверхности стали 40X13, полученные в ходе эксперимента при обработке фрезерованием, сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты опытов

Точки плана $v$	$Ra_1$	$Ra_2$	$\overline{Ra}$	$S_v^2$
	$y_1$	$y_2$	$\bar{y}_v$	
1	1,55	1,61	1,58	0,0018
2	0,8	0,88	0,84	0,0032
3	1,85	1,93	1,89	0,0032
4	1,1	1,22	1,16	0,0072
5	1,05	1,15	1,1	0,005
6	0,42	0,46	0,44	0,0008
7	1,29	1,43	1,36	0,0098
8	0,67	0,73	0,7	0,0018

Уравнение регрессии представлено в виде формулы:

$$\tilde{y} = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{i,j} b_{ij} x_i x_j + b_{123} x_1 x_2 x_3. \quad (4.1)$$

Рассчитываем коэффициенты  $b_i$ , которые соответствуют коэффициентам  $\beta_i$ . Ортогональность имеющейся матрицы при осуществляемом планировании эксперимента является преимуществом, так как в этом случае упрощен процесс расчета коэффициентов по формуле [66; 144]:

$$b_i = \frac{\sum_{v=1}^n x_{iv} \bar{y}_v}{n}, \quad (4.2)$$

где  $i = 0, 1, 2 \dots, k$  – номер фактора;

$\bar{y}_v$  – средний отклик по  $r$  опытам в точке с номером  $v$ :

$$\bar{y}_v = \frac{\sum_{j=1}^r y_{vj}}{r}. \quad (4.3)$$

Рассчитываем коэффициенты уравнения. Искомый коэффициент рассчитывается как алгебраическое сложение каждого из факторов, который варьируется на двух уровнях, кроме  $x_0$  и столбца  $y$  соответствующего фактора, деленного на число точек при планировании:

$$b_0 = \frac{\sum x_{0v} \bar{y}_v}{n} = \frac{1}{8} (1,58 + 0,84 + 1,89 + 1,16 + 1,1 + 0,44 + 1,36 + 0,7) = 1,134. \quad (4.4)$$

Аналогично рассчитываются остальные значения  $b_i$  (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Коэффициенты уравнения математической модели

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_{123}$
1,134	-0,348	0,143	-0,234	0,001	0,019	-0,014	-0,001

При определении безразмерных переменных  $X_i$  используется преобразование  $x_i$ , где величиной масштаба является выражение  $\frac{1}{2} (\ln x_{i \max} - \ln x_{i \min})$ :

$$X_i = \frac{2(\ln x_i - \ln x_{i \min})}{\ln x_{i \max} - \ln x_{i \min}} + 1. \quad (4.5)$$

После подстановки  $X_i$  вместо  $x_i$  уравнение примет вид:

$$y = \lg Ra_0 = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{1,2} X_1 X_2 + \dots + b_{2,3} X_2 X_3 + b_{1,2,3} X_1 X_2 X_3. \quad (4.6)$$

Реализация плана позволила получить уравнение в преобразованных переменных  $X_i$ :

$$\tilde{y} = 1,134 - 0,348X_1 + 0,143X_2 - 0,234X_3 + 0,001X_1X_2 + 0,019X_1X_3 - 0,014X_2X_3 - 0,001X_1X_2X_3. \quad (4.7)$$

Для обеспечения достоверности проведенного эксперимента получаемые уравнения проходят статистический анализ. Любой эксперимент может содержать ошибку, поэтому проводится серия опытов при одинаковых условиях. Дисперсия, определяющая величину ошибки, рассчитывается по формуле:

$$S_v^2 = \frac{\sum_{j=1}^r (y_{vj} - \bar{y}_v)^2}{r - 1}, \quad (4.8)$$

где  $r$  – число повторных опытов в точках плана.

При определении усредненной дисперсии  $S^2(y)$ , являющейся средней арифметической из дисперсий всех вариантов опыта, рассчитывается по формуле:

$$S^2\{y\} = \frac{\sum_{v=1}^n S_v^2}{n}. \quad (4.9)$$

Для нашего решения из таблицы 4.1 имеем, что

$$\sum_{v=1}^n S_v^2 = 0,0328. \quad (4.10)$$

Тогда

$$S^2\{y\} = \frac{0,0328}{8} = 0,0041. \quad (4.11)$$

Однородность дисперсий, означающая, что среди всех определенных дисперсий нет значений, значительно отличающихся от других, проверяется с помощью критерия Фишера и Кохрена. Если определяемое количество дисперсий превышает значение  $k=2$ , использование критерия Фишера неэффективно вследствие того, что в такой оценке учитываются наибольшая и наименьшая дисперсии. Если число опытов в каждой точке планирования одинаковое, следует применять критерий Кохрена, в таком случае производится поиск наибольшей дисперсии и вычисляется ее отношение к сумме всех дисперсий. Пользуясь полученными данными при экспериментальном исследовании, найдем:

$$G = \frac{0,0098}{0,0328} = 0,299. \quad (4.12)$$

Применяя таблицу, представленную в работе [66], определяем число степеней свободы для таких дисперсий с уровнем значимости 5 %. Критическое значение  $G_{кр} = 0,78$ . Однородность принимается в случае, если найденное критическое значение критерия Кохрена больше расчетного.

Применяя метод наименьших квадратов, найдем искомую математическую модель. Проведем статистическую оценку. Исследуемые параметры оптимизации являют собой нормально распределенные случайные величины, характеризующие регрессионный анализ, а величины дисперсий в любом из опытов одинаковы. Нарушение описанных условий приводит к ошибке и в ходе вычислений обнаруживается.

Необходимо проверить значимость каждого из найденных коэффициентов с помощью критерия Стьюдента, при расчете которого дисперсия коэффициента регрессии находится по формуле:

$$S^2\{b_i\} = \frac{S^2\{y\}}{nr}, \quad (4.13)$$

с  $f_E = n(r-1)$  степенями свободы.

В нашем случае:

$$S\{b_i\} = \sqrt{S^2\{b_i\}} = \sqrt{\frac{0,0041}{8 \cdot 2}} = 0,016. \quad (4.14)$$

По приведенной формуле можно наблюдать, что все дисперсии одинаковы и зависят от числа опытов и величины ошибки. Определим значения  $t_i$ -критерия Стьюдента по формуле:

$$t_i = \frac{|b_i|}{S\{b_i\}}. \quad (4.15)$$

Для нашей задачи находим значения  $t_i$ -критерия и вносим в таблицу 4.3:

$$t_0 = \frac{1,134}{0,016} = 60,67. \quad (4.16)$$

Таблица 4.3 – Значения  $t_i$ -критерия

$t_0$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_{12}$	$t_{13}$	$t_{23}$	$t_{123}$
70,82	21,78	8,98	14,6	0,08	1,17	0,85	0,08

По соответствующей таблице в работе [66] при 8 степенях свободы и уровне значимости 5 % находим критическое значение  $t_i$ -критерия. Исходя из полученных данных,  $t_{кр} = 1,86$ . В случае, если критическое значение больше, то коэффициент  $b_i$  считается незначимым и приравнивается к нулю, и, наоборот, если критическое значение коэффициента меньше  $b_i$ , то он считается значимым. Незначимыми коэффициентами, исходя из полученных данных, являются  $b_{12}$ ,  $b_{13}$ ,  $b_{23}$ ,  $b_{123}$ . Рассчитываем доверительный интервал:

$$\Delta b_i = t_{кр} s\{b_i\} = 1,86 \cdot 0,016 = 0,043. \quad (4.17)$$

При условии ортогональной матрицы планирования эксперимента определяется доверительный интервал для каждого коэффициента регрессии. Коэффициент регрессии принимается в случае, если его значение выше половины доверительного интервала, если коэффициент не принимается, его можно считать незначимым и не пересчитывать остальные коэффициенты регрессии. В результате определения значимости коэффициентов регрессии получаем математическую модель. По математической модели можно сделать вывод о влиянии коэффициентов регрессии на критерий оптимизации в зависимости от его значения.

Математическая модель получила следующий вид:

$$\hat{y} = \lg Ra = 1,134 - 0,348X_1 + 0,143X_2 - 0,234X_3. \quad (4.18)$$

В уравнение (4.17) подставим значения  $X_i$  по формуле (4.8) и получим:

$$\hat{y} = 2,52 - 0,433 \ln x_1 + 0,207 \ln x_2 + 0,674 \ln x_3. \quad (4.19)$$

После потенцирования имеем степенную зависимость для натуральных величин:

$$Ra = 16,44V^{-0,43}S_0^{0,21}t^{0,67}. \quad (4.20)$$



Адекватность применения полученной математической модели можно оценить с помощью остаточной дисперсии  $\sigma_{ад}^2$ , которая рассчитывается по формуле:

$$S_{ад}^2 = \frac{r}{n - m} \sum_{v=1}^n (\bar{y}_v - \hat{y}_v)^2, \quad (4.21)$$

где  $m$  – число членов аппроксимирующего полинома включая свободный член.

Остаточная дисперсия, характеризующая адекватность полученной математической модели, определяется с числом степеней свободы.

$$f_{ад} = n - m. \quad (4.22)$$

Проверить гипотезу об адекватности можно, используя критерий Фишера, при котором сравниваются генеральные дисперсии в виде отношения:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S^2\{y\}}. \quad (4.23)$$

По таблице работы [66] определяется критерий  $F_{кр}$  для соответствующих имеющихся степеней свободы:

$$f_{ад} = n - m \text{ и } f_E = n(r - 1), \quad (4.24)$$

Нуль-гипотеза принимается в случае, если полученное значение меньше найденного по таблице при уровне значимости –  $\alpha\%$ . Иначе гипотеза считается несостоявшейся, и математическая модель является неадекватной.

Адекватность математической модели можно оценить только при количестве степеней свободы больше нуля. При повторных опытах, согласно матрице планирования эксперимента, считается, что отклик дает несмещенную совместную оценку. Неадекватность математической модели выражается значимостью разности  $b_0 - \bar{y}_0$ , содержащей сведения о значениях коэффициентах. При незначимых значениях коэффициентов регрессии их можно отбросить, в таком случае число полученных членов уравнения будет меньше числа точек в матрице планирования эксперимента, а оставшиеся степени свободы будут подвержены проверке гипотезы на адекватность.

Используем условие  $b_0 - \bar{y}_0 \rightarrow \sum \beta_{ii}$  и значимость коэффициентов:

$$|b_0 - \widehat{y}_0| = |1,134 - 1,145| = 0,01129. \quad (4.25)$$

Ошибка эксперимента  $S\{y\} = 0,064$  больше, чем полученная величина разности, а значит, полученная математическая модель адекватна.

Аналогичное решение проведем для задачи описания зависимости показателя величины шероховатости при обработке формообразующих поверхностей из стали 38ХНМ сферическими фрезами от скорости резания –  $V$ , подачи на оборот –  $S_o$  и глубины резания –  $t$ . Для минимизации влияния случайных параметров в процессе фрезерования один из результатов был отброшен. Результаты шероховатости обработанной поверхности стали 38ХНМ, полученные в ходе эксперимента при обработке фрезерованием, сведем в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты опытов

Точки плана $v$	$Ra_1$	$Ra_2$	$\overline{Ra}$	$S_v^2$
	$y_1$	$y_2$	$\overline{y}_v$	
1	1,78	1,94	1,86	0,0128
2	0,95	1,03	0,99	0,0032
3	2,06	2,24	2,15	0,0162
4	1,44	1,56	1,5	0,0072
5	1,26	1,38	1,32	0,0072
6	0,5	0,54	0,52	0,0008
7	1,55	1,69	1,62	0,0098
8	0,85	0,93	0,89	0,0032

После расчетов запишем коэффициенты математической модели (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Коэффициенты уравнения математической модели

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_{123}$
1,356	-0,381	0,184	-0,269	0,0363	-0,001	-0,002	-0,002

Реализация плана позволила получить уравнение в преобразованных переменных  $X_i$ :

$$\hat{y} = 1,356 - 0,381X_1 + 0,184X_2 - 0,269X_3 + 0,0363X_1X_2 - 0,001X_1X_3 - 0,002X_2X_3 - 0,002X_1X_2X_3. \quad (4.26)$$

Проверка однородности дисперсий, означающая, что среди всех определенных дисперсий нет значений, значительно отличающихся от других, проверяется с помощью критерия Кохрена:

$$G = \frac{0,0162}{0,06} = 0,27.$$

По критерию Стьюдента проверяем значимость каждого коэффициента (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Значения  $t_i$ -критерия

$t_0$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_{12}$	$t_{13}$	$t_{23}$	$t_{123}$
62,43	17,55	8,45	12,37	1,67	0,06	0,75	0,86

В нашем случае  $t_{кр} = 1,86$ . В случае, если критическое значение больше, то коэффициент  $b_i$  считается незначимым и приравнивается к нулю, и, наоборот, если критическое значение коэффициента меньше  $b_i$ , то он считается значимым. Построим доверительный интервал длиной  $2\Delta b_i$ :

$$\Delta b_i = t_{кр} s\{b_i\} = 1,86 \cdot 0,0217 = 0,04. \quad (4.27)$$

Таким образом, математическая модель получила следующий вид:

$$\hat{y} = \lg Ra = 1,356 - 0,381X_1 + 0,184X_2 + 0,269X_3. \quad (4.28)$$

В уравнение (4.28) подставим значения  $X_i$  по формуле (4.5) и получим:

$$\hat{y} = 2,96 - 0,474 \ln x_1 + 0,265 \ln x_2 + 0,775 \ln x_3. \quad (4.29)$$

После потенцирования имеем степенную зависимость для натуральных величин:

$$Ra = 19,29V^{-0,47} S_0^{0,27} t^{0,78}. \quad (4.30)$$

Используем условие  $b_0 - \bar{y}_0 \rightarrow \sum \beta_{ii}$  и проведем оценку значимости коэффициентов:

$$|b_0 - \widehat{y}_0| = |1,356 - 1,347| = 0,0091. \quad (4.31)$$

Ошибка эксперимента  $S\{y\} = 0,087$  больше, чем полученная величина разности, а значит, полученная математическая модель адекватна.

По данным зависимостям проведена оптимизация режимов резания по критерию  $Ra \leq 0,4$  мкм и назначены режимы фрезерования для сферической фрезы, которой велась обработка образцов в процессе экспериментального исследования, –  $V=150$  м/мин;  $S_0=0,3$  мм;  $t=0,2$  мм. Режимы, полученные в результате оптимизации, применены для последующего изготовления формообразующих деталей литейных пресс-форм по управляющим программам ЧПУ, составленным на основе рекомендаций рациональной траектории и математического моделирования процесса движения расплава в пресс-форме.

Аналогичное решение проведем для задачи описания зависимости показателя высоты макрорельефа при обработке формообразующих поверхностей от кривизны обрабатываемой поверхности –  $\rho$ , шага поперечной подачи –  $\Delta S_0$  и радиуса обрабатывающего инструмента –  $R_{фр}$ . Степенная зависимость будет иметь вид

$$R = e^{-1,79} \rho^{-0,16} \Delta S^{1,57} R_{фр}^{-0,61}. \quad (4.32)$$

При решении задачи описания показателя величины времени заполнения полостей пресс-форм от направления макрорельефа –  $\alpha$ , высоты макрорельефа –  $R$  и величины шероховатости –  $Ra$  получены степенные зависимости для различных коэффициентов подобия  $k$ .

$$Tз = e^{8,02} \alpha^{-0,94} R^{0,42} R_a^{0,22} \text{ для } k \leq 0,25 \text{ при } \alpha=90^\circ \dots 180^\circ, \quad (4.33)$$

$$Tз = e^{-2,25} \alpha^{1,14} R^{0,55} R_a^{0,31} \text{ для } 0,25 < k \leq 0,5 \text{ при } \alpha=90^\circ \dots 180^\circ, \quad (4.34)$$

$$Tз = e^{-2,52} \alpha^{1,27} R^{0,63} R_a^{0,38} \text{ для } 0,5 < k < 2 \text{ при } \alpha=45^\circ \dots 90^\circ, \quad (4.35)$$

$$Tз = e^{8,75} \alpha^{-1,15} R^{0,46} R_a^{0,36} \text{ для } 2 \leq k < 4 \text{ при } \alpha=90^\circ \dots 180^\circ, \quad (4.36)$$

$$Tз = e^{-1,12} \alpha^{1,02} R^{0,51} R_a^{0,27} \text{ для } k \geq 4 \text{ при } \alpha=90^\circ \dots 180^\circ. \quad (4.37)$$

Для проведения комплекса экспериментальных исследований по определению функциональной зависимости величины времени заполнения  $T_3$  для полостей с различными коэффициентами подобия, проводилось заполнение полостей с различными параметрами поверхности. Параметры поверхности получены в результате фрезерования поверхностей пресс-форм по технологии направленного формирования макрорельефа.

На основании моделей, полученных в ходе проведения полного факторного эксперимента, для определения функциональной связи шероховатости обрабатываемой поверхности в зависимости от назначаемых режимов фрезерования сталей 40Х13 и 38ХНМ построены графики зависимости шероховатости обработанной поверхности от скорости резания –  $V$ , подачи на оборот –  $S_0$  и глубины резания –  $t$  (рисунки 4,1; 4,2; 4,3).

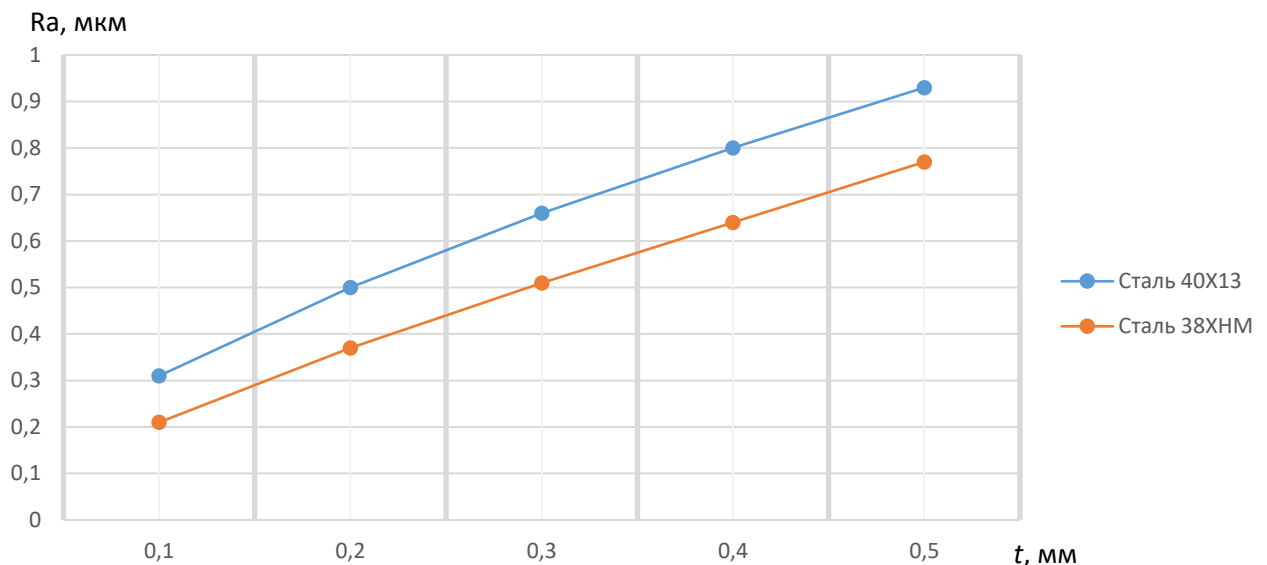


Рисунок 4.1 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности  $Ra$  от глубины при фрезеровании:  $V=150$  м/мин,  $S_0=0,3$  мм/об

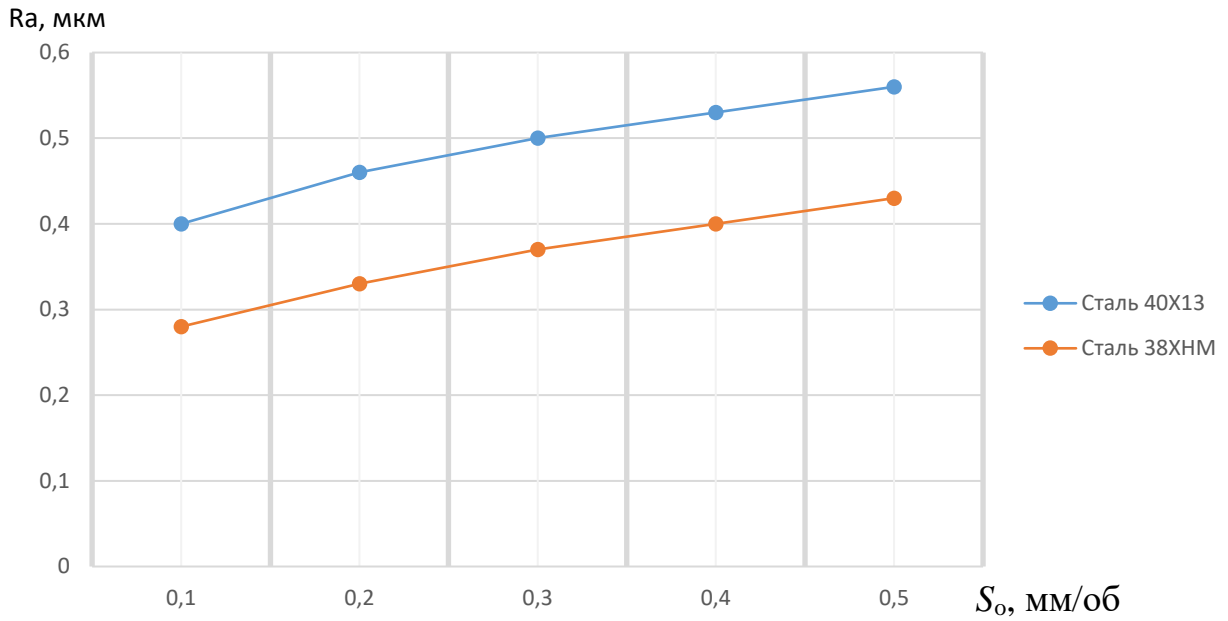


Рисунок 4.2 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  от подачи при фрезеровании:  $V=150$  м/мин,  $t=0,2$  мм

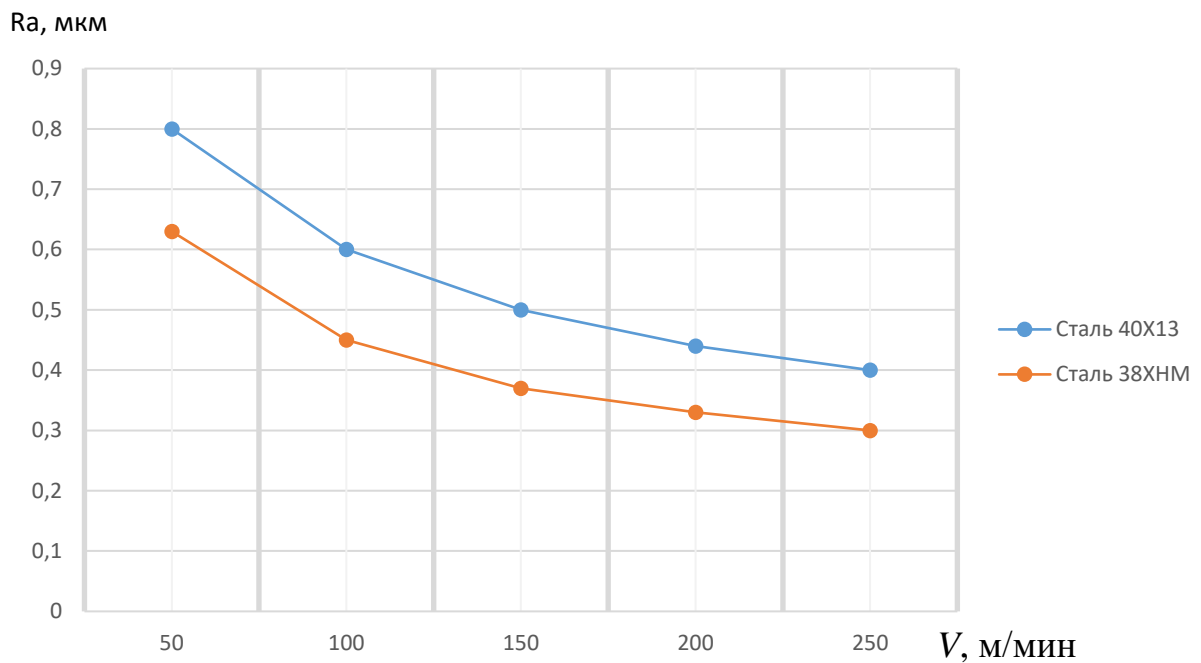


Рисунок 4.3 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  от скорости при фрезеровании:  $S_0=0,3$  мм/об,  $t=0,2$  мм

График зависимости  $R_a$  от  $V$  показывает, что при увеличении скорости резания высота неровностей уменьшается. Параметры  $S_0$  и  $t$  меньше влияют на величину шероховатости, при увеличении подачи на оборот  $S_0$  и глубины резания  $t$   $R_a$  возрастает в результате избыточного давления инструмента на материал.

Математические модели, полученные в ходе проведения экспериментальных исследований определения функциональной связи шероховатости обрабатываемой поверхности в зависимости от назначаемых режимов фрезерования сталей 40Х13 и 38ХНМ, показывают зависимости, получаемые непосредственно в результате применения конкретного оборудования, инструмента и условий фрезерования, в которых будет проводиться дальнейшая обработка пресс-форм.

На основании моделей, полученных в ходе проведения полного факторного эксперимента, для определения функциональной связи высоты макрорельефа обрабатываемой поверхности в зависимости от параметров поверхности и параметров фрезерования построены графики зависимости макрорельефа обработанной поверхности от кривизны обрабатываемой поверхности –  $\rho$ , шага поперечной подачи –  $\Delta S$  и радиуса обрабатывающего инструмента –  $R_{\text{фр}}$  (рисунки 4,4; 4,5; 4,6).

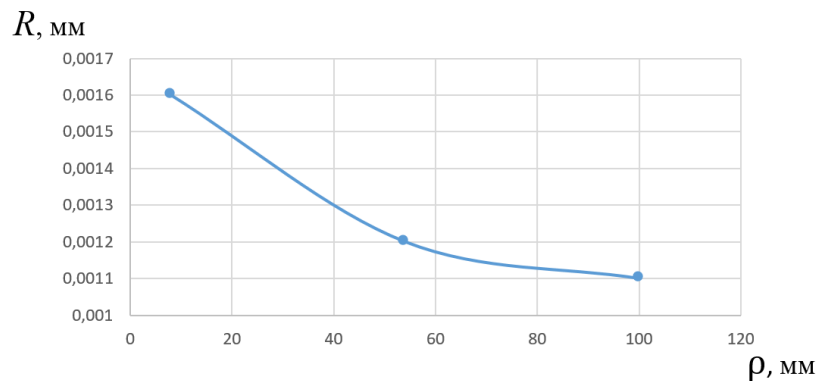


Рисунок 4.4 – Зависимость макрорельефа обработанной поверхности  $R$  от кривизны обрабатываемой поверхности

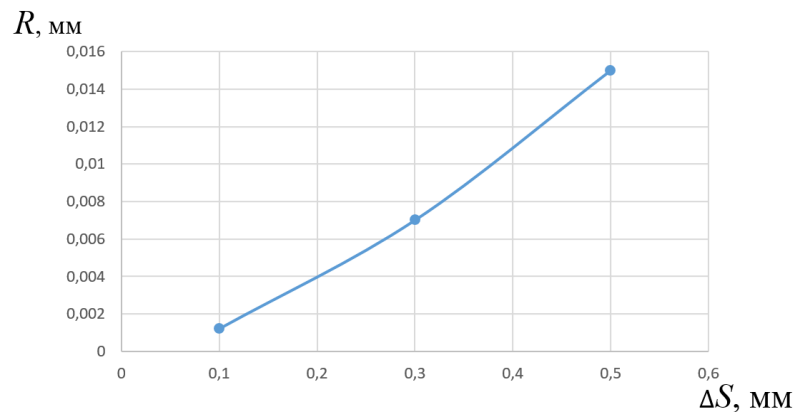


Рисунок 4.5 – Зависимость макрорельефа обработанной поверхности  $R$  от поперечной подачи при фрезеровании

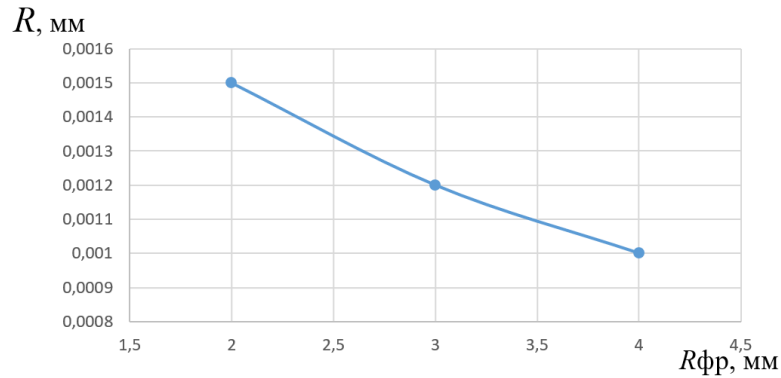
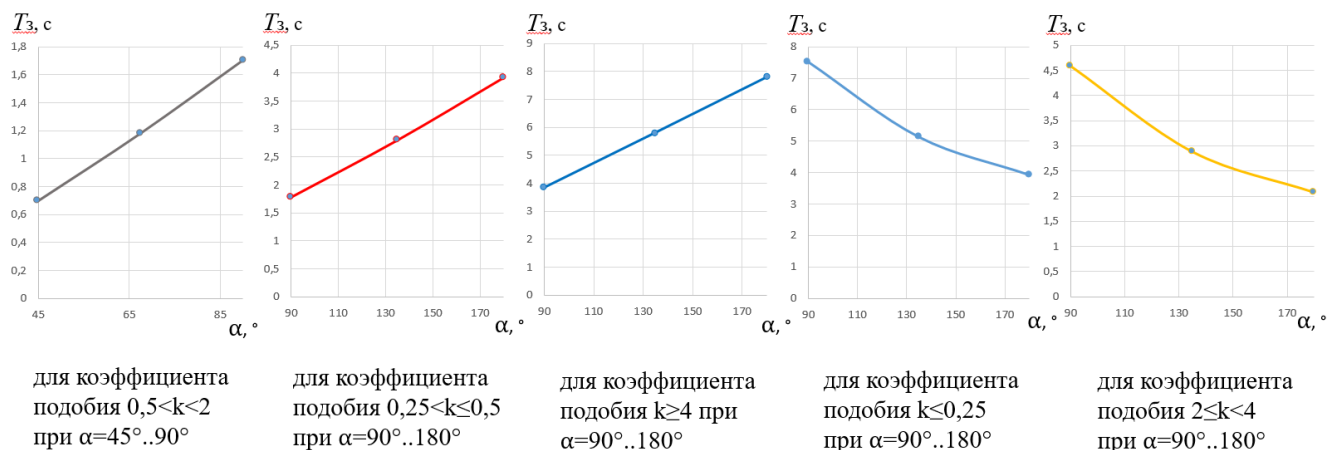


Рисунок 4.6 – Зависимость макрорельефа обработанной поверхности  $R$  от радиуса обрабатывающего инструмента

График зависимости  $R$  от  $\Delta S$  показывает, что при увеличении поперечной подачи (шага строчки) при фрезеровании поверхности высота макрорельефа значительно увеличивается. Параметры  $R_{фр}$  и  $\rho$  также влияют на величину макрорельефа, при их увеличении величина макрорельефа уменьшается.

На основании моделей, полученных в ходе проведения полного факторного эксперимента, для определения функциональной связи величины времени заполнения в зависимости от параметров поверхности построены графики зависимости величины времени заполнения от направления макрорельефа –  $\alpha$ , высоты макрорельефа –  $R$  и величины шероховатости –  $R_a$  (рисунки 4,7; 4,8; 4,9). На рисунках представлены графики для различных коэффициентов подобия:  $K_1 - k \leq 0,25$  при  $\alpha = 90^\circ \dots 180^\circ$ ,  $K_2 - 0,25 < k \leq 0,5$  при  $\alpha = 90^\circ \dots 180^\circ$ ,  $K_3 - 0,5 < k < 2$  при  $\alpha = 45^\circ \dots 90^\circ$ ,  $K_4 - 2 \leq k < 4$  при  $\alpha = 90^\circ \dots 180^\circ$ ,  $K_5 - k \geq 4$  при  $\alpha = 90^\circ \dots 180^\circ$ .



для коэффициента подобия  $0,5 < k < 2$  при  $\alpha = 45^\circ \dots 90^\circ$

для коэффициента подобия  $0,25 < k \leq 0,5$  при  $\alpha = 90^\circ \dots 180^\circ$

для коэффициента подобия  $k \geq 4$  при  $\alpha = 90^\circ \dots 180^\circ$

для коэффициента подобия  $k \leq 0,25$  при  $\alpha = 90^\circ \dots 180^\circ$

для коэффициента подобия  $2 \leq k < 4$  при  $\alpha = 90^\circ \dots 180^\circ$

Рисунок 4.7 – Зависимость времени заполнения  $T_z$  от направления макрорельефа



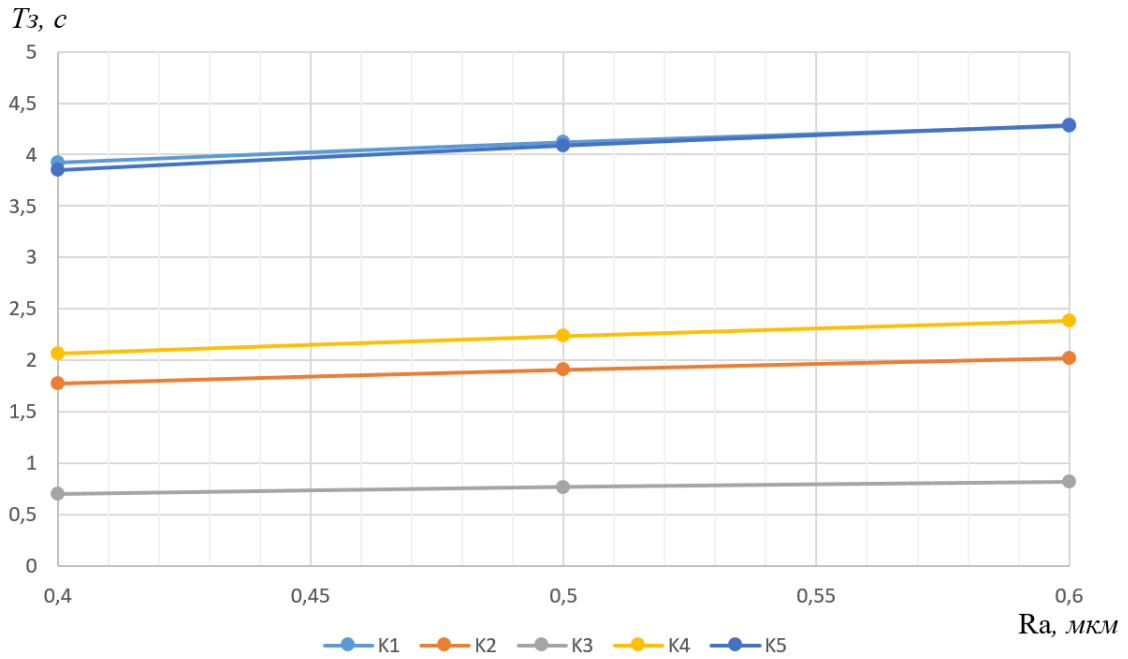


Рисунок 4.8 – Зависимость времени заполнения  $T_3$  от величины шероховатости

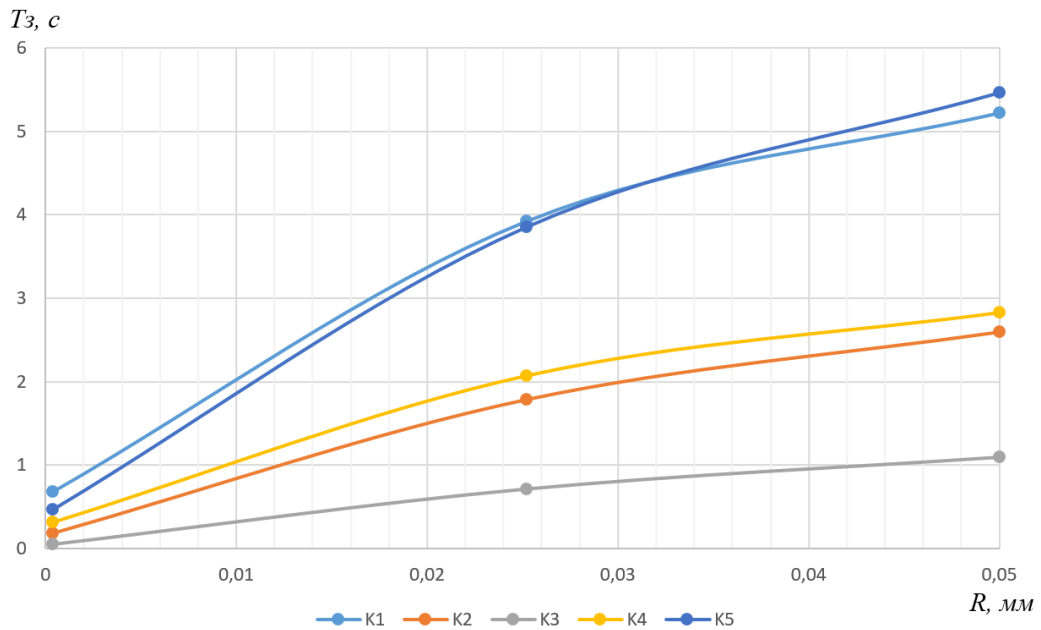


Рисунок 4.9 – Зависимость времени заполнения  $T_3$  от высоты макрорельефа

Графики зависимости  $T_3$  от  $Ra$  и  $R$  показывают, что при увеличении шероховатости поверхности по которой течет расплав, а также при увеличении величины макрорельефа время заполнения полости увеличивается. При изменении угла  $\alpha$  время заполнения  $T_3$  изменяется по-разному в зависимости от геометрических параметров полости.

## **4.2 Результаты последовательного проектирования изделий пресс-форм и разработки управляющих программ ЧПУ для внедрения новой технологии фрезерования формообразующих поверхностей на примере детали «Заглушка»**

При математическом моделировании процесса движения расплава в пресс-форме решается комплексная задача обеспечения технологичности как детали из ПКМ, так и элементов пресс-форм. Применение CAD/CAM/CAE-систем позволяет проследить все этапы моделирования конечного изделия и пресс-формы, конструкции которых неразрывно связаны между собой [11]. Любые сложные геометрические элементы изделия из ПКМ непременно отразятся на формообразующих поверхностях пресс-формы и будут усложнять конструкцию литниковой системы, системы охлаждения и выталкивания. Разнообразные факторы, влияющие на конструктивные решения и разработку технологического процесса, усложняют процесс отслеживания жизненного цикла изделия. Эта проблема решается построением единой 3D-модели, в которой отражаются конструктивные особенности изделия из ПКМ, конструктивные особенности пресс-формы, результаты математического моделирования течения расплава [49; 53; 121]. Результаты математического моделирования течения расплава получены в программном модуле SolidWorks Plastics.

Изготовление пресс-форм на станках с ЧПУ является дорогостоящей частью подготовки производства, поэтому необходимо обеспечить необходимое качество поверхностей пресс-формы на операции фрезерования. От качества формообразующей поверхности зависит и качество поверхностей конечной детали из ПКМ, и то, какое количество циклов детали пресс-форм будут обеспечивать предъявляемые требования к детали из ПКМ и формообразующим поверхностям. Обеспечение необходимых требований и правильно выбранная конструкция пресс-формы и ее элементов позволяет снизить процент брака и сократить затраты на обработку изделий после операции литья. Однако при использовании ТНФМ возможно увеличение производительности цикла литья, снижение

изнашиваемости формообразующих деталей пресс-форм. Для этого необходимо определить направление движения расплава в пресс-форме, поэтапно рассмотрим этот процесс на примере детали «Заглушка».

Деталь из ПКМ (рисунок 4.10) конструируется в САД-системе, ей назначаются допуски, шероховатость на рабочих поверхностях и допуск на износ и шероховатость формообразующих поверхностей пресс-форм, исходя из области применения и конструктивных особенностей детали.

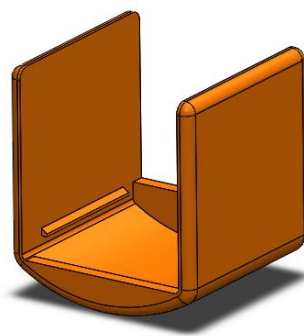


Рисунок 4.10 – Общий вид литевой детали из ПКМ «Заглушка»

Затем по техническому заданию определяется количество деталей в пресс-форме, отливаемое за один цикл, и создается 3D-модель литниковой системы (рисунок 4.11).

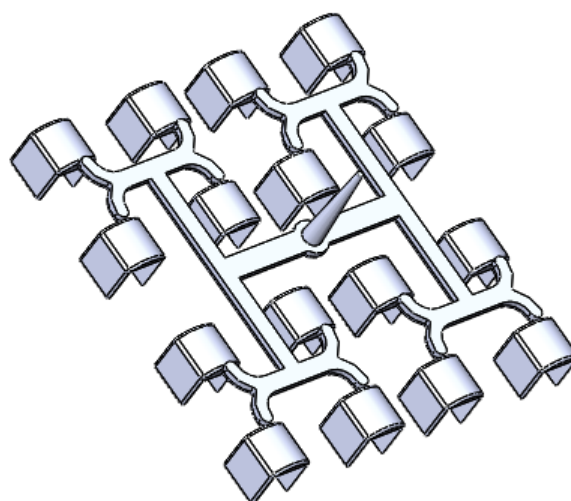


Рисунок 4.11 – Литниковая система на 16 деталей типа «Заглушка»

Требуется провести анализ литниковой системы и оценить влияние технологических параметров литья на процесс технологического цикла. Изменение геометрического расположения отливок в литниковой системе и размеров литникового канала приводит к изменению направления главного вектора течения расплава и влияет на такие технологические параметры литья, как объем и давление впрыска. Для получения модели движения расплава в САЕ-системе и увеличения точности полученных результатов разбиваем деталь на максимально возможное количество тетраэдров с минимальной стороной треугольника, чем меньше сторона треугольника при моделировании, тем полученные результаты точнее. В нашем случае при размере стороны треугольника 0,39 получаем 346 296 тетраэдров, что обеспечит точность выполнения моделирования (рисунок 4.12).

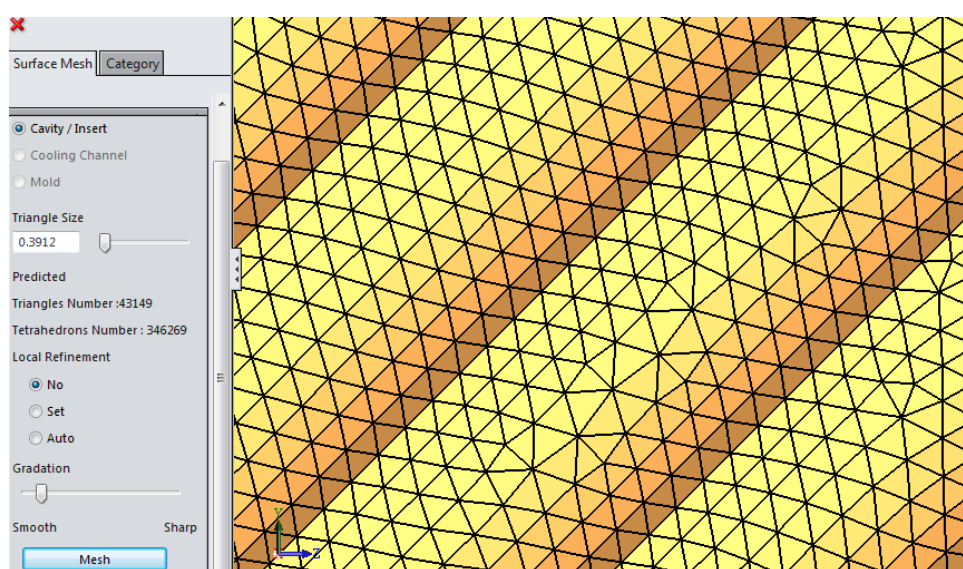


Рисунок 4.12 – Разбиение детали «Заглушка» на тетраэдры

Окончательный вариант геометрических характеристик литниковой системы выбирается в ходе анализа, и наиболее подходящий вариант, учитывая габаритные размеры пресс-формы, выбирается в виде окончательной модели литниковой системы, по которой проводится анализ в САЕ-системе. Проанализированы несколько конфигураций литниковой системы и выбран наилучший вариант с минимальным объемом и давлением впрыска, обеспечивающий минимальное общее время заполнения  $T_{\text{общ}}$  (рисунок 4.13).

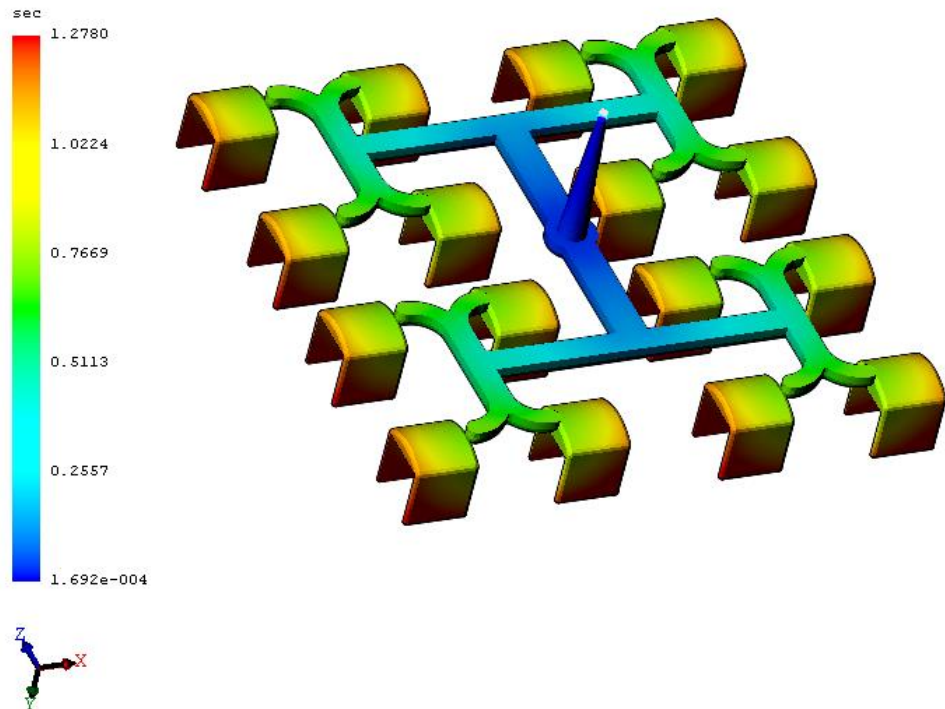


Рисунок 4.13 Многополостная литниковая система детали «Заглушка» при анализе общего время заполнения  $T_{\text{общ}}$  в САЕ-системе

В то же время для достижения минимального значения и определения течения расплава, а также общего времени заполнения пресс-формы  $T_{\text{общ}}$  учитываются теплофизические свойства ПКМ, заданные конструкторско-технологической документацией. Направление потока расплава в литниковой системе является основой для определения стратегии фрезерования во время обработки, а также может влиять на технологию производства пресс-формы и ее конструкцию. В результате моделирования процесса движения расплава получаем модель, по которой можно определить главный вектор течения для каждой детали литниковой системы (рисунок 4.14). На основании результатов моделирования и определения главного вектора принимаем решение о формировании траектории обработки на основе рекомендаций, полученных во второй главе.

Исходя из 3D-моделей выбранной литниковой системы и изготавливаемой детали из ПКМ, проектируются формообразующие детали пресс-форм и другие элементы, из которых формируется 3D-модель пресс-формы (рисунок 4.15). По 3D-

модели разрабатываются рабочие чертежи пресс-форм и формообразующих деталей, исходя из требований к детали из ПКМ.

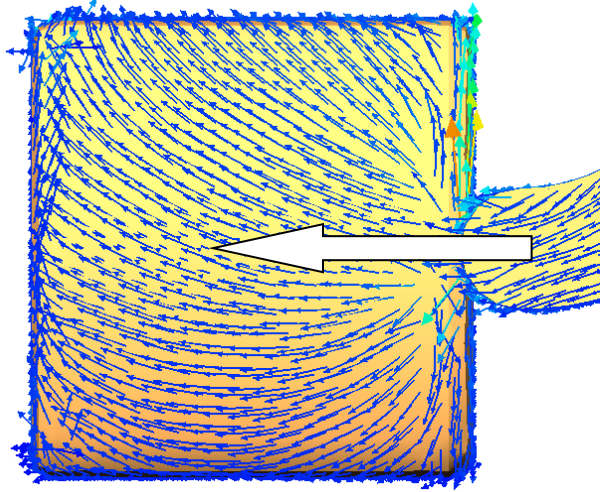


Рисунок 4.14 – Направление главного вектора течения расплава в детали «Заглушка»

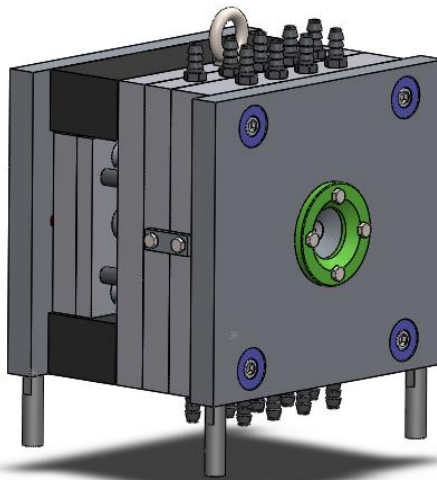


Рисунок 4.15 – 3D-модель литейной пресс-формы детали «Заглушка»

Спроектированные детали пресс-формы, а в частности формообразующие детали пуансон и матрица, являются деталями, с которыми соприкасается расплав во время технологического цикла литья. Для обработки этих деталей требуется разработать управляющую программу. Управляющая программа для изготовления формообразующих деталей разрабатывается в САМ-системе Unigraphics NX.

Имитация процесса движения обрабатывающего инструмента во время обработки формообразующих поверхностей при подготовке управляющих программ на станки с ЧПУ позволяет избежать столкновения инструмента с заготовкой во время механической обработки. Анализ процесса фрезерования позволяет адаптировать и внедрить управляющую программу в производственный процесс и позволяет учесть техническую оснащенность участка и станка, на котором изготавливаются формообразующие детали пресс-форм. На стадии проектирования решаются многие технологические проблемы, которые позволяют снизить время обработки и достичь требуемых параметров качества поверхности во время механической обработки [47; 94].

Последовательность технологической подготовки производства по новой технологии направленного формообразования макрорельефа при фрезеровании представлена на рисунке 4.16.

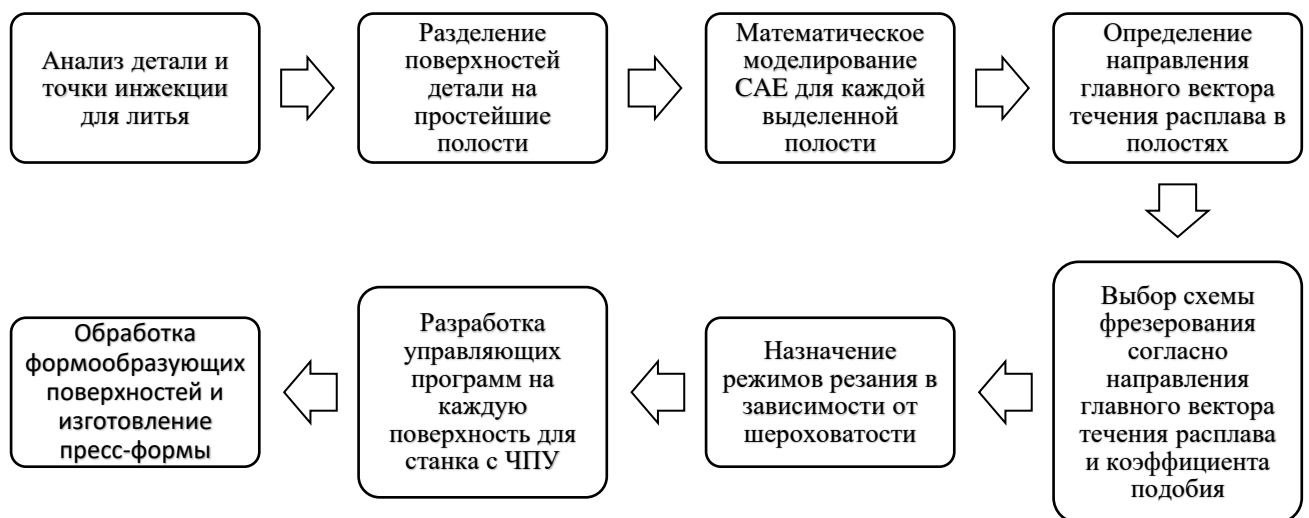


Рисунок 4.16 – Схема этапов подготовки производства литейных деталей пресс-форм для применения новой технологии формирования направленного макрорельефа при фрезеровании

Рассмотренные этапы проектирования позволяют технологу, занимающемуся изготовлением пресс-форм, а также конструктору, занимающемуся проектированием изделий из ПКМ и пресс-форм, более полно

ознакомиться с процессами, происходящими при изготовлении и эксплуатации пресс-форм. Особенности геометрии деталей пресс-форм, последовательно получившиеся из геометрии изделия из ПКМ, спроектированные конструктором, влияют на решения, принимаемые при подготовке производства обработки пресс-форм, а также выбор оборудования и инструмента для получения формообразующих поверхностей деталей.

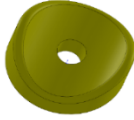




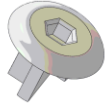
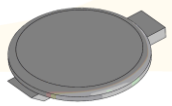
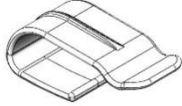


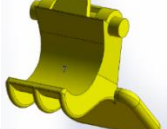
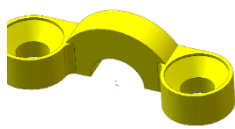
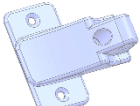
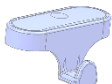
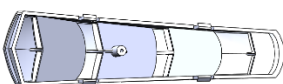
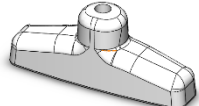
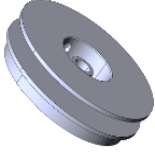
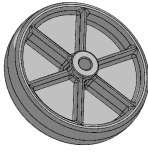


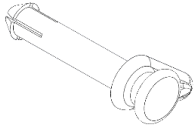
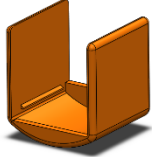
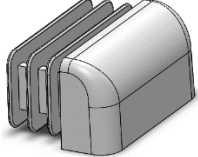

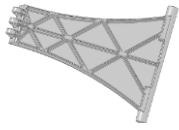

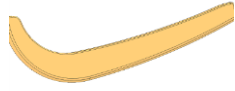
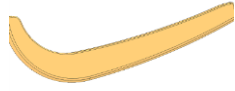
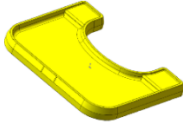
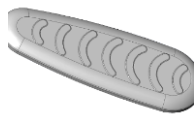
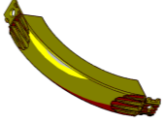
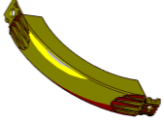

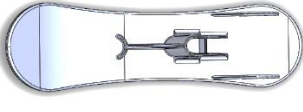



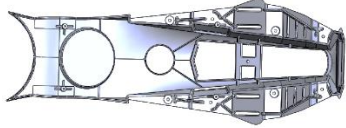


Таким образом, применение последовательного проектирования изделий литьевых пресс-форм и разработки управляющих программ ЧПУ для внедрения новой технологии фрезерования формообразующих поверхностей имеет существенное значение для технологов-машиностроителей в области получения деталей из ПКМ.

#### **4.3 Результаты применения новой технологии программирования фрезерной обработки формообразующих поверхностей в зависимости от направления движения расплава в различных полостях пресс-форм**

В ходе экспериментальных исследований были изготовлены 38 пресс-форм, в которых изготавливаются детали из ПКМ, и назначены литьевые машины для проведения измерений производительности технологического цикла литья (таблица 4.17). Для каждого изделия из ПКМ обработаны формообразующие детали пресс-форм по разработанным управляющим программам для станков с ЧПУ с учетом выбора рациональных углов траектории по отношению к главному вектору течения расплава. Для повышения степени точности и полноты исследуемых данных первая часть пресс-форм изготовлена по серийной технологии, вторая часть пресс-форм – по новой технологии направленного формирования макрорельефа при фрезеровании, а третья часть имела несколько гнезд, где одно или группа гнезд формообразующих деталей изготавливались по ТНФМ, а другие обрабатывались по серийной технологии, не предусматривающей определенного направления макрорельефа, а руководствуясь стандартными траекториями и их направлениями в САМ-системах.



Таблица 4.17 – Детали из ПКМ для экспериментальных исследований

Изображение				ТПА
				CUN 110
				
				CUN 150
				
				CUN 250
				
				CUN 360
				CUN 420
				CUN 650
				CUN 800

На примере обработки формообразующих рассмотренных деталей пресс-форм для изделий «Заглушка» и «Накладка» рассмотрим составление управляющих программ для станков с ЧПУ.

Относительно точки инъекции определен главный вектор течения расплава в соответствии с методикой математического моделирования движения расплава, для детали «Заглушка» на рисунке 4.18, для детали «Накладка» на рисунке 4.19. Для выбора рациональной траектории макрорельефа при фрезеровании необходимо определить коэффициент подобия для каждой из простейших поверхностей пресс-форм и рассчитать их по формулам относительно определенной точки инъекции.

Для этого необходимо расположить формообразующие поверхности относительно точки инъекции детали из ПКМ, выделить полости, по которым будет двигаться материал, нанести размеры, соответствующие размерам формообразующих деталей пресс-форм, и определить коэффициенты подобия, а затем, согласно рекомендованным значениям углов направления макрорельефа, назначить требуемый угол для обеспечения параметров технологического цикла литья.

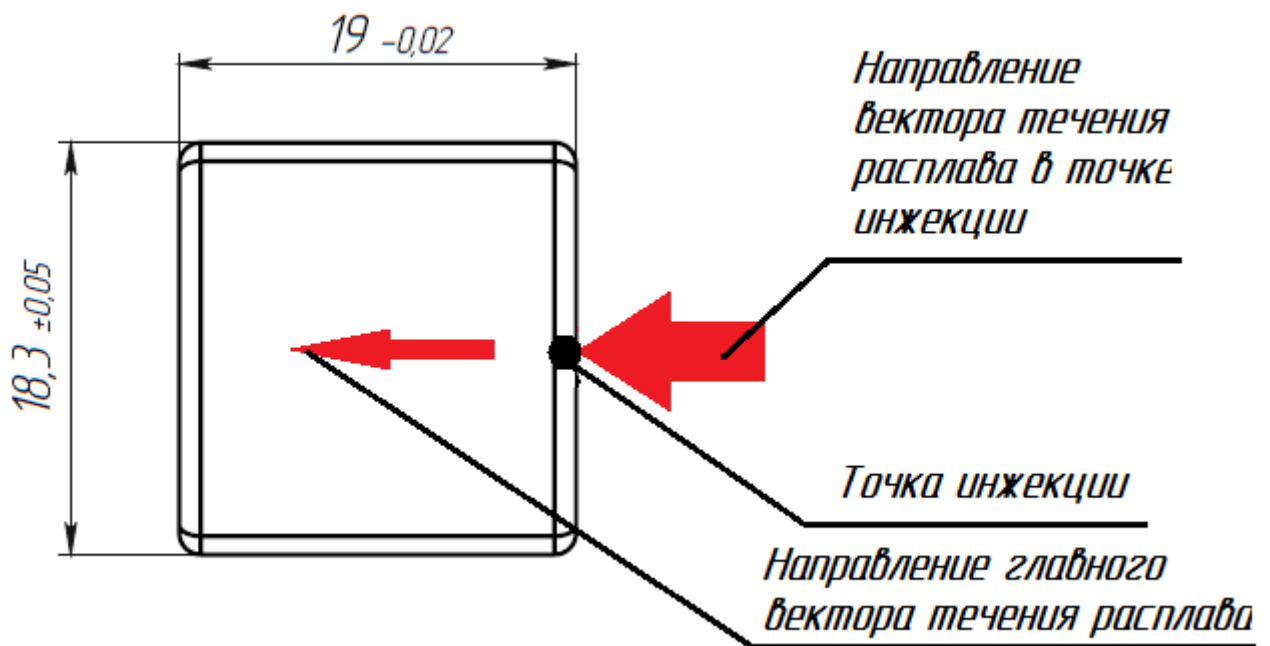


Рисунок 4.18 – Направление течения расплава детали «Заглушка» согласно математическому моделированию

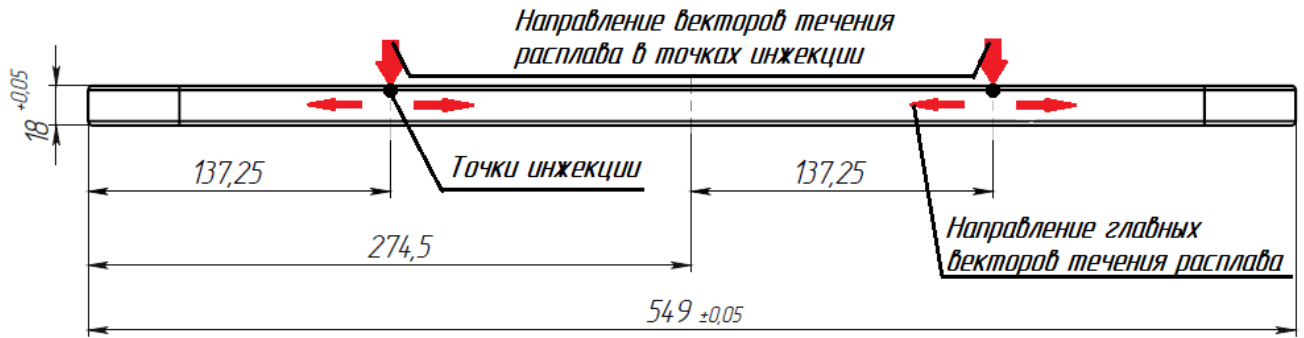


Рисунок 4.19 – Направление течения расплава детали «Накладка» согласно математическому моделированию

Таким образом, деталь «Заглушка» имеет одну простейшую поверхность размером 18,3x19мм, а деталь «Накладка» имеет четыре равных поверхности размером 18x137,25мм, относительно которых выбирается рациональная траектория фрезерования. Коэффициент подобия относительно направления вектора течения расплава в точке инъекции рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{l_1}{l_2}. \quad (4.38)$$

Для детали «Заглушка»:

$$k_{\text{загл.}} = \frac{18,3}{19} = 0,96. \quad (4.39)$$

Для детали «Накладка»:

$$k_{\text{загл.}} = \frac{18}{137,25} = 0,13. \quad (4.40)$$

Таким образом, для детали «Заглушка» с коэффициентом подобия  $k=0,96$  рациональным углом фрезерования будет являться  $\alpha=45^\circ$ , а для детали «Накладка» с коэффициентом подобия  $k=0,13$  фрезерование под углом  $\alpha=180^\circ$  по отношению к главному вектору течения расплава. Пресс-форма для детали «Заглушка» имеет 16 гнезд, восемь из которых обрабатывались с рациональным углом  $\alpha=45^\circ$ , а остальные гнезда с углом  $\alpha=90^\circ$ . Пресс-форма для детали «Накладка» имеет два гнезда, одно из которых обрабатывалось с рациональным углом  $\alpha=180^\circ$ , а другое с углом  $\alpha=90^\circ$ . Такой подход позволит провести сравнительный анализ экспериментальных исследований обработки пресс-форм и выявить результат

зависимости износа, шероховатости и производительности технологического цикла литья от выбранного угла фрезерования.

Выбрав углы  $\alpha$ , по которым будет двигаться обрабатывающий инструмент, необходимо спроецировать выбранную траекторию фрезерования на формообразующие поверхности деталей пресс-форм и разработать управляющую программу для станков с ЧПУ в САМ-системе Unigraphics NX.

На 3D-моделях формообразующих деталей пресс-форм выбираем необходимую поверхность (рисунок 4.20), назначаем шаблон фрезерования «Зигзаг», а затем задаем необходимый угол  $\alpha$ , принятый для этой поверхности. Здесь же, исходя из требований по шероховатости к формообразующей поверхности, задаем расчётную высоту гребешка в зависимости от характеристик выбранного обрабатывающего инструмента (рисунок 4.21) и назначаем режимы фрезерования по зависимостям, полученным в ходе полного факторного эксперимента.

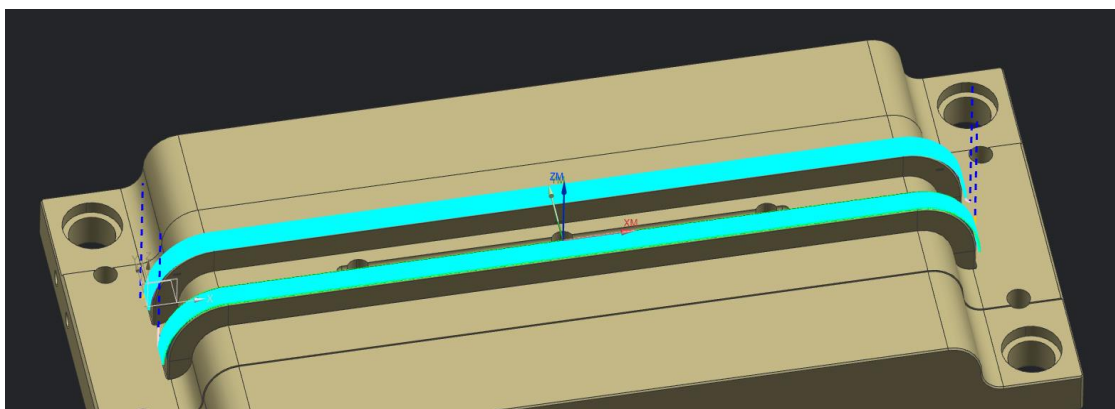


Рисунок 4.20 – Формообразующие поверхности пуансона детали «Накладка»

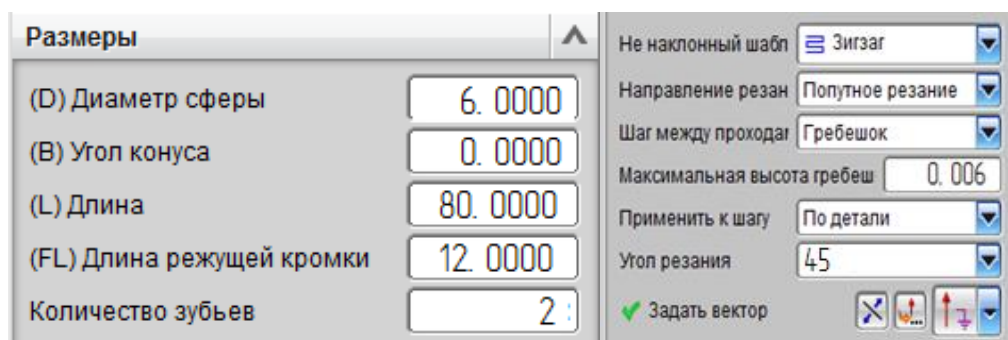


Рисунок 4.21 – Характеристики обрабатывающего инструмента и шаблона фрезерования

Формируем траекторию фрезерования на формообразующих поверхностях деталей пресс-форм пуансона (рисунок 4.22, *а*) и матрицы (рисунок 4.22, *б*). Для каждой поверхности и каждого гнезда используется своя траектория обработки, рассматривая траекторию фрезерования на примере обработки пуансона детали «Накладка», видно, что одно гнездо имеет траекторию с углом обработки  $\alpha=180^\circ$  (рисунок 4.23, *а*), а другое с углом  $\alpha=90^\circ$  (рисунок 4.23, *б*).

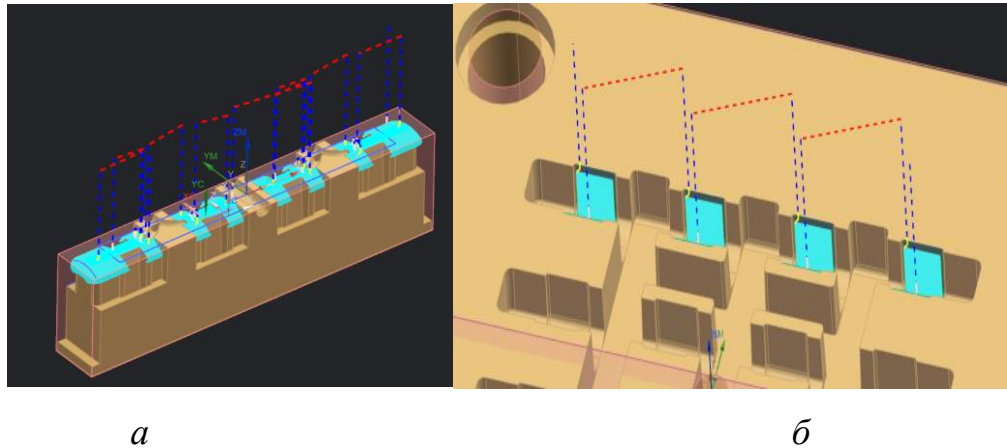


Рисунок 4.22 – Траектория обработки пуансона детали «Заглушка» (*а*) и траектория обработки матрицы детали «Заглушка» (*б*)

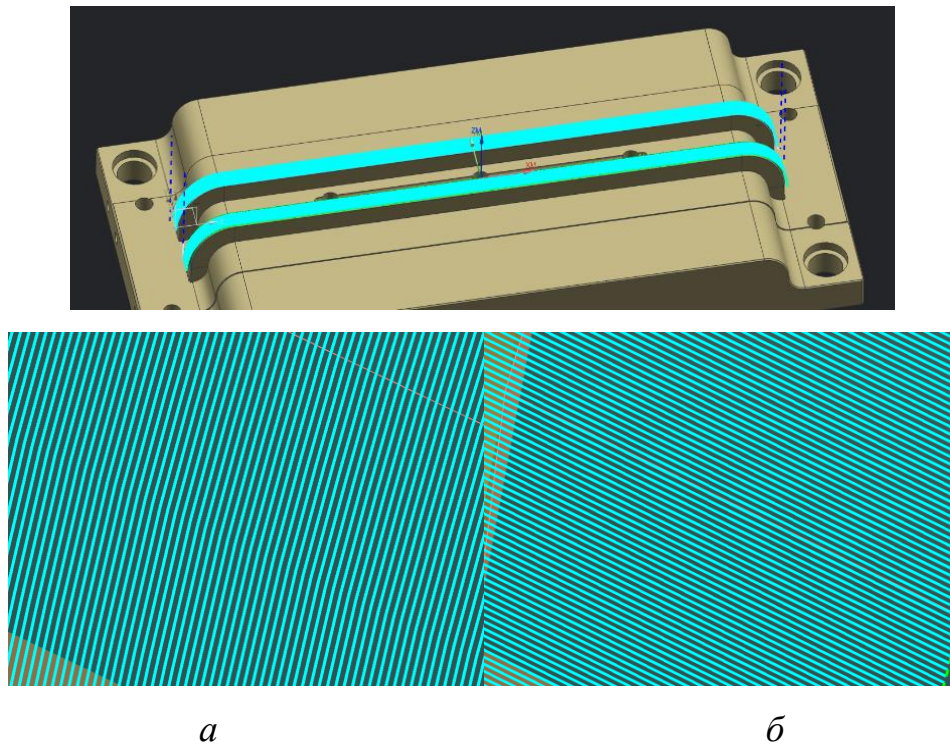


Рисунок 4.23 – Траектория обработки первого гнезда детали «Накладка» (*а*) и траектория обработки второго гнезда детали «Накладка» (*б*)



В ходе экспериментальных исследований были изготовлены 38 матриц и пуансонов для пресс-форм деталей из ПКМ. На рисунке 4.24 представлены обработанные формообразующие детали пресс-формы – пуансон и матрица для изделия «Заглушка».

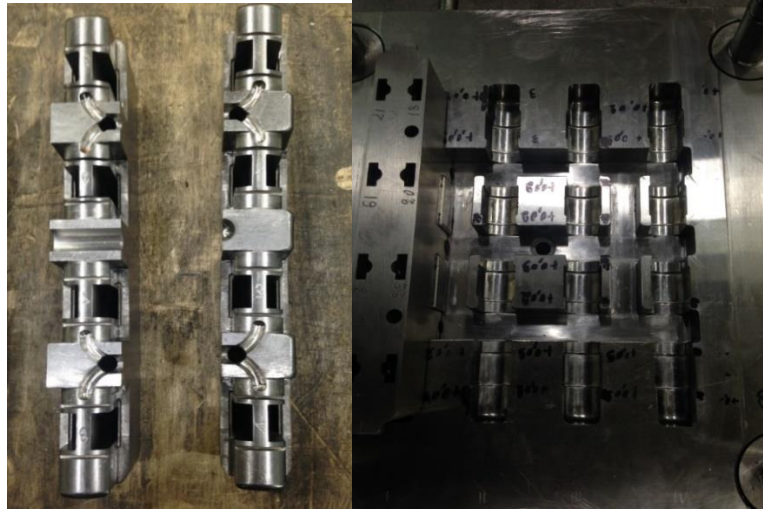


Рисунок 4.24 – Формообразующие детали пресс-формы для изделия «Заглушка»

Таким образом, обработанные формообразующие детали с различным углом  $\alpha$  (рисунок 4.25) по отношению к главному вектору течения расплава являются частью пресс-форм (рисунок 4.26), в результате работы которых получены данные экспериментальных исследований по зависимости износа, шероховатости и производительности технологического цикла литья от выбранного угла фрезерования.



Рисунок 4.25 – Траектория обработки восьми гнезд матрицы детали «Заглушка» с  $\alpha=45^\circ$  (а) и траектория обработки восьми гнезд матрицы детали «Заглушка» с  $\alpha=90^\circ$  (б)



Рисунок 4.26 – Литьевые пресс-формы, обработанные в ходе экспериментальных исследований

Получение результатов экспериментальных исследований по зависимости износа, шероховатости и производительности технологического цикла литья от выбранного угла фрезерования проводилось на производственном участке на термопластавтоматах (рисунок 4.27) в процессе получения готовых деталей из ПКМ (рисунок 4.28).



Рисунок 4.27 – Пример термопластавтомата, применяемого для получения результатов экспериментальных исследований

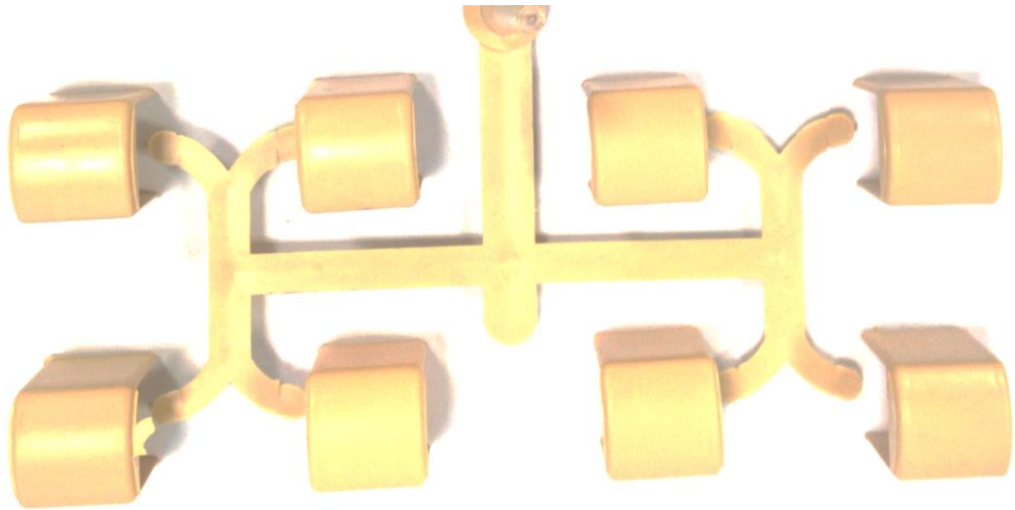


Рисунок 4.28 – Деталь «Заглушка», полученная в ходе экспериментальных исследований

Результаты применения новой технологии программирования фрезерной обработки формообразующих поверхностей в зависимости от направления движения расплава в различных полостях пресс-форм можно использовать для проведения работ и исследований деталей из ПКМ различных конструкций и размеров. В процессе производственной реализации новой технологии направленного формирования макрорельефа при фрезеровании был проведен большой объем работы по анализу геометрических особенностей и проливаемости деталей из ПКМ, программированию фрезерных операций в САМ-системах на основе рекомендаций выбора направления траектории фрезерования, изготовлению формообразующих деталей пресс-форм. Проанализирован большой объем данных о работе пресс-форм во время их эксплуатации, а также величинам износа формообразующих поверхностей в течение длительного времени на различных временных промежутках, характеризующих различное количество циклов работы пресс-формы и количество полученных изделий из ПКМ во время технологического цикла литья.

Полученные результаты сведены в таблицы и на основании их сделаны выводы о влиянии новой технологии направленного формирования макрорельефа



на формообразующих поверхностях при фрезеровании на качество, производительность, износостойкость пресс-форм.

#### **4.4 Результаты влияния новой технологии направленного формирования макрорельефа на формообразующих поверхностях при фрезеровании на качество, производительность и износостойкость пресс-форм**

В ходе работы произведены замеры производительности технологического цикла литья при получении изделий из ПКМ на литьевых термопластавтоматах, износа и величины шероховатости формообразующих поверхностей деталей для 38 литьевых пресс-форм, однако для сокращения изложенных данных и результатов практической реализации внедрения новой технологии направленного формирования макрорельефа при фрезеровании будем рассматривать 4 пресс-формы для изделий из ПКМ. Исходя из данных чертежей деталей из ПКМ, предъявляемые требования по допустимой шероховатости и допустимому износу поверхностей пресс-форм, вследствие агрессивного влияния материала ПКМ на формообразующие поверхности сведены в таблицу 4.8.

Таблица 4.8 – Требования к поверхностям пресс-форм

Параметр	Значение			
	1800–4103	0606–1022	1800–4064	1800–4076
Пресс-форма	1800–4103	0606–1022	1800–4064	1800–4076
Заданная шероховатость, Ra	0,4	0,4	0,5	0,4
Допустимая шероховатость, Ra	0,63	0,63	1,25	1,25
Допустимый износ, мкм	10	10	20	20

В процессе получения готовых деталей из ПКМ на встроенном программном обеспечении термопластавтоматов произведены замеры производительности цикла литья для гнезд, изготовленных по технологии направленного формирования

макрорельефа при фрезеровании, и гнезд, изготовленных по серийной технологии, а результаты сведены в таблицу 4.9.

При замерах в одном случае требовалось заполнить полость, изготовленную по технологии направленного формирования макрорельефа, во втором случае заполнить полость, изготовленную по серийной технологии. В каждом рассмотренном случае другие полости глушились и не заполнялись, таким образом получены результаты замеров времени технологического цикла литья. Сокращение времени литья рассчитывалось от времени литья при серийной технологии.

Таблица 4.9 – Изменение времени технологического цикла литья в зависимости от метода обработки

Пресс-форма	№ гнезда	Метод обработки	Время технологического цикла литья, с	Сокращение времени цикла литья, %
1800–4103	1-4	Новая технология	12,3	25
	5-8	Серийная технология	16,5	
0606–1022	1	Новая технология	35,8	20
	2	Серийная технология	44,8	
1800–4064	1-2	Новая технология	30,8	22
	3-4	Серийная технология	39,5	
1800–4076	1	Новая технология	69,1	26
	2	Серийная технология	93,7	

Результаты изменения времени технологического цикла литья в зависимости от применяемой технологии обработки представлены в виде гистограммы (рисунок 4.29), видно, что использование новой технологии направленного формирования

макрорельефа при фрезеровании пресс-форм позволяет снизить время заполнения полостей на 25 % относительно применяемой серийной технологии.

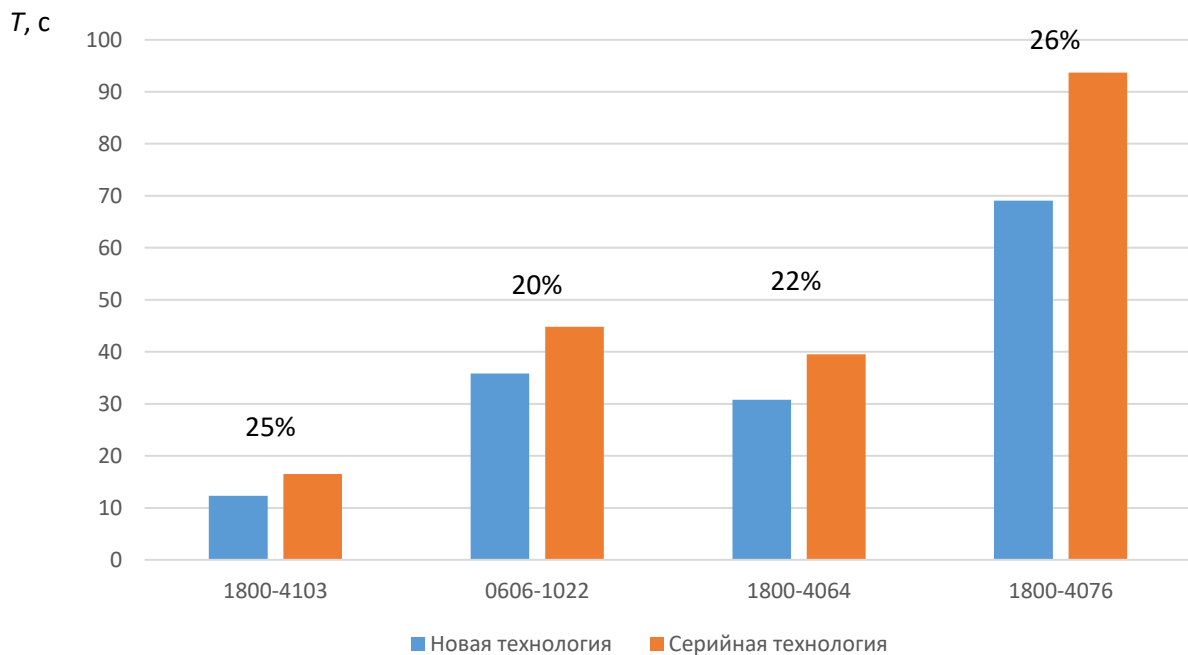


Рисунок 4.29 – Гистограмма повышения производительности пресс-форм в результате применения новой технологии направленного формообразования макрорельефа при фрезеровании

Более высокая интенсивность заполнения пресс-формы при использовании рациональной траектории обработки формообразующих поверхностей свидетельствует, что такая траектория создает наиболее благоприятное направление макрорельефа, которое совпадает с течением расплава.

В процессе эксплуатации пресс-форм проведены замеры износа формообразующих поверхностей на каждые 10 тыс. циклов смыкания пресс-формы с помощью микроскопа, видно, что при применении новой технологии направленного формирования макрорельефа при фрезеровании износ и количество дефектов на формообразующей поверхности значительно меньше, что иллюстрируется снимками с электронного микроскопа (рисунок 4.30). Результаты замеров сведены в таблицу 4.10. На основании результатов замеров построены графики зависимости износа от количества циклов при обработке по серийной

технологии и по методу направленного формообразования макрорельефа (рисунок 4.31).

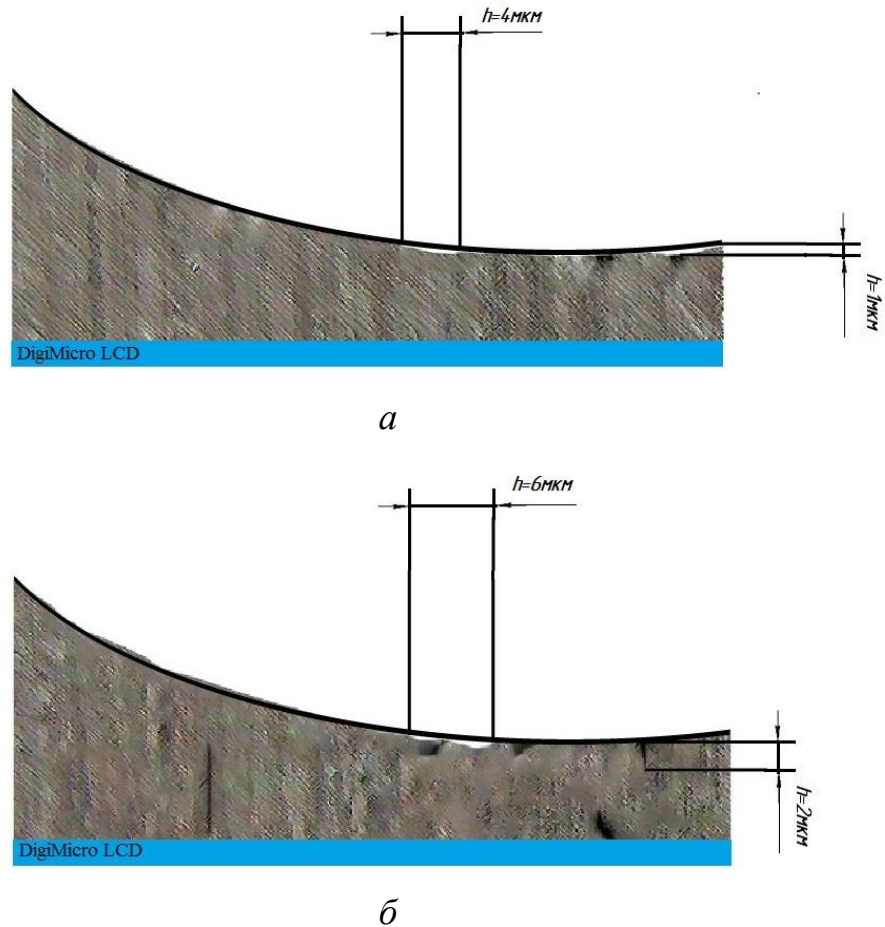


Рисунок 4.30 – Результаты измерения износа формообразующей поверхности обработанной по новой технологии (а), и замер износа формообразующей поверхности обработанной по серийной технологии (б)

Измерение износа проводилось на поверхностях деталях литейных пресс-форм, подверженных абразивному износу вследствие течения по формообразующим поверхностям материала ПКМ. Не было возможности проводить измерение износа на всех поверхностях из-за конструкции микроскопа и геометрических особенностей формообразующих деталей пресс-форм, поэтому измерения проводились преимущественно на формообразующих пуансонах и знаках. Пятно износа в отдельных случаях достигало 5 мм, однако, исходя из конструкторской документации на литейные детали из ПКМ, часто регламентируется только величина износа, не затрагивая ее площадь. Это связано

с особенностью эксплуатации литевых деталей из ПКМ, получаемых методом литья под давлением в литевых пресс-формах.

Таблица 4.10 – Изменение износа в зависимости от количества циклов пресс-формы

Пресс-форма	Метод обработки	Износ в зависимости от количества циклов, мкм						Средний износ на тыс. циклов, мкм	Изменение износа, %
		10 тыс.	20 тыс.	30 тыс.	40 тыс.	50 тыс.	60 тыс.		
1800–4103	Новая технология	0	0	1..2	2..3	3	3	0,05	45
	Серийная технология	0	1	2..3	3..5	5	5..6	0,092	
0606–1022	Новая технология	0	1	1..2	2	2..3	3..4	0,058	37
	Серийная технология	1	2..3	2..3	3..4	4..6	5..6	0,092	
1800–4064	Новая технология	0	1	1..2	2	2..4	3..5	0,066	34
	Серийная технология	1	2..3	2..3	3..4	5..6	5..7	0,1	
1800–4076	Новая технология	0	1	1..2	1..2	2	2..3	0,041	45
	Серийная технология	0	2	2..3	3..4	4	4..5	0,075	

Результаты изменения износа на формообразующих поверхностях в зависимости от применяемой технологии обработки представлены в виде гистограммы (рисунок 4.32), видно, что использование новой технологии направленного формирования макрорельефа при фрезеровании пресс-форм позволяет снизить износ на формообразующих поверхностях на 45 % относительно применяемой серийной технологии.

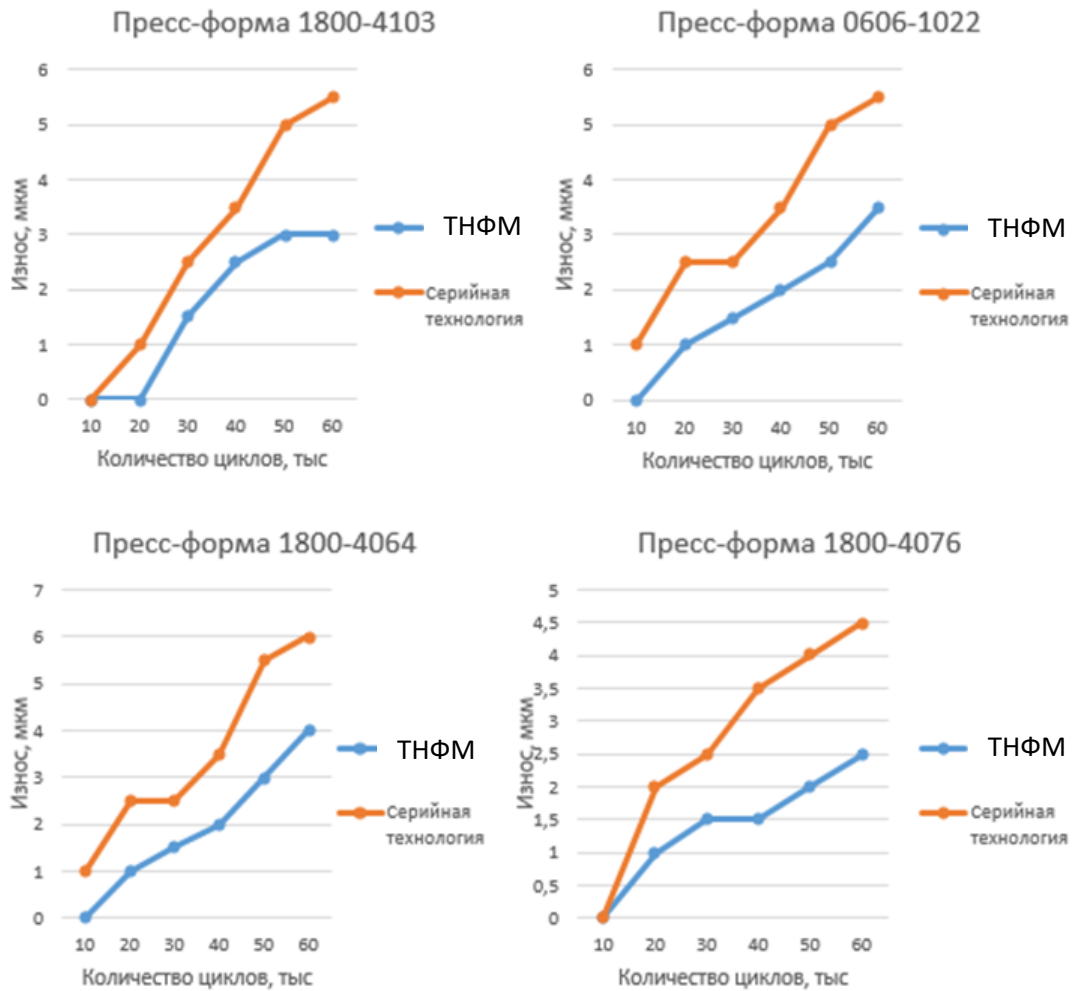


Рисунок 4.31 – Графики зависимости износа формообразующих поверхностей пресс-форм в зависимости от количества циклов и технологии фрезерования

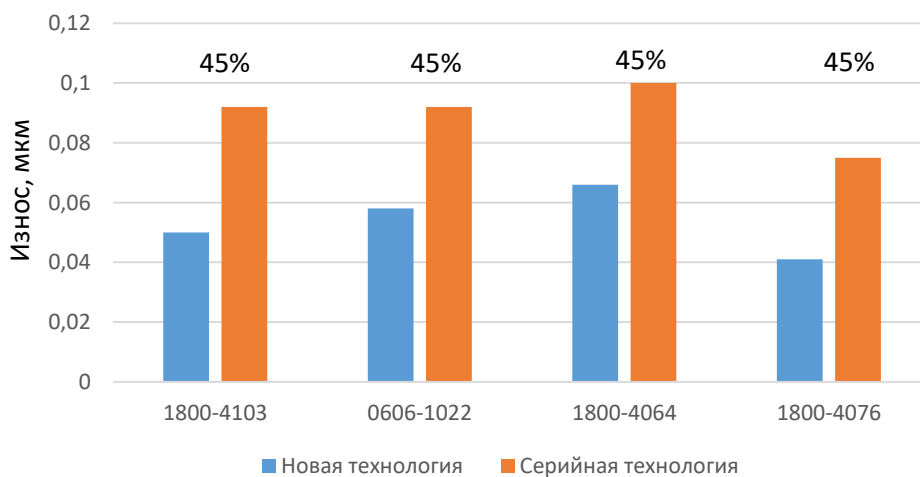


Рисунок 4.32 – Гистограмма снижения износа формообразующих поверхностей пресс-форм в результате применения новой технологии направленного формообразования макрорельефа при фрезеровании

При получении изделий из ПКМ пресс-формы подвергаются интенсивному изнашиванию, и происходит изменение сформированного макрорельефа, это отражается на величине шероховатости формообразующих поверхностей. Проведены замеры величины шероховатости на каждые 30 тыс. циклов смыкания пресс-формы с помощью профилометра, видно, что при применении новой технологии направленного формирования макрорельефа при фрезеровании, в отличие от использования серийной технологии, значение шероховатости изменяется медленней. Результаты замеров сведены в таблицу 4.11.

Таблица 4.11 – Изменение шероховатости в зависимости от количества циклов пресс-формы

Пресс-форма	Метод обработки	Шероховатость в зависимости от количества циклов, Ra			Изменение шероховатости, %
		0	30 тыс.	60 тыс.	
1800–4103	Новая технология	0,39	0,43	0,45	13
	Серийная технология	0,39	0,44	0,52	
0606–1022	Новая технология	0,4	0,44	0,46	4
	Серийная технология	0,4	0,46	0,48	
1800–4064	Новая технология	0,38	0,48	0,56	25
	Серийная технология	0,38	0,52	0,75	
1800–4076	Новая технология	0,39	0,42	0,47	8
	Серийная технология	0,39	0,43	0,51	

Результаты изменения шероховатости Ra на формообразующих поверхностях в зависимости от количества циклов работы пресс-формы

представлены на рисунках 4.33, 4.34, 4.35, 4.36, видно, что при фрезеровании формообразующих поверхностей по новой технологии направленного формирования макрорельефа при фрезеровании шероховатость изменяется медленней.

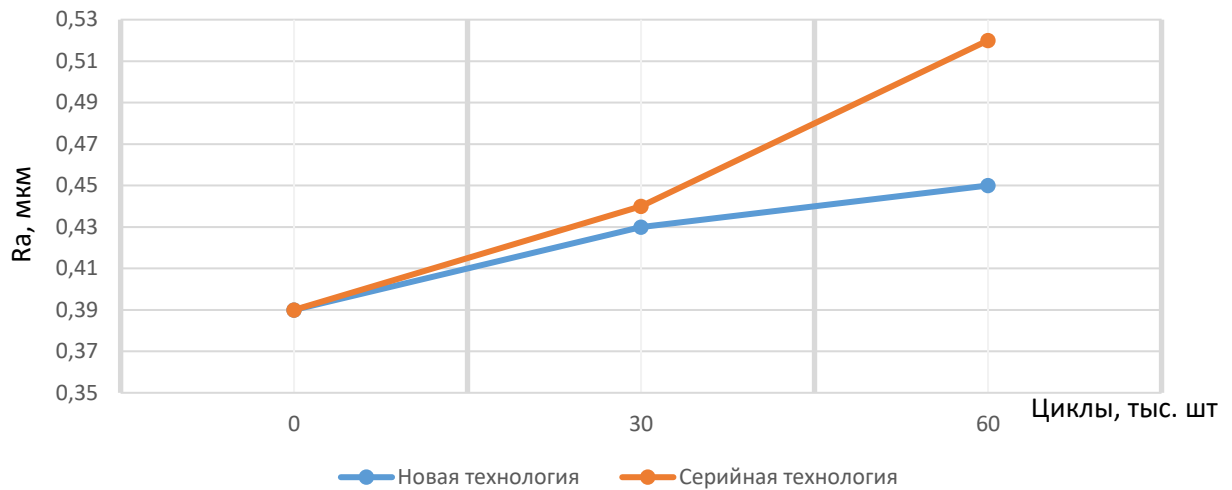


Рисунок 4.33 – Изменение шероховатости Ra на формообразующих поверхностях пресс-формы 1800–4103 в течении 60 тыс. циклов работы пресс-формы

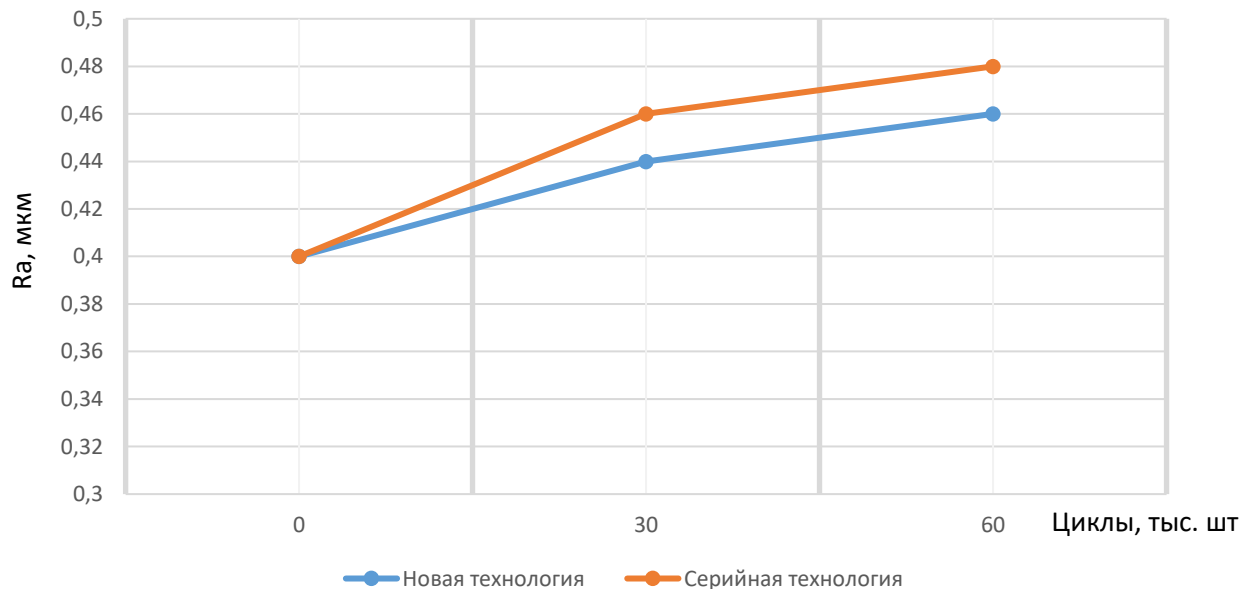


Рисунок 4.34 – Изменение шероховатости Ra на формообразующих поверхностях пресс-формы 0606–1022 в течении 60 тыс. циклов работы пресс-формы



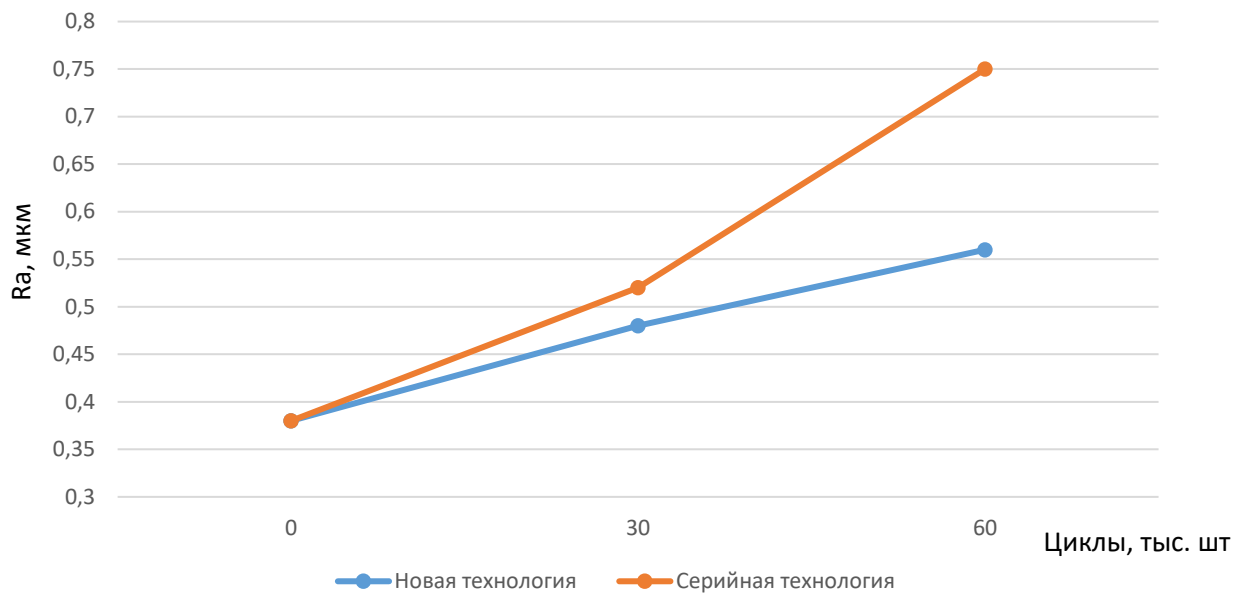


Рисунок 4.35 – Изменение шероховатости Ra на формообразующих поверхностях пресс-формы 1800–4064 в течении 60 тыс. циклов работы пресс-формы

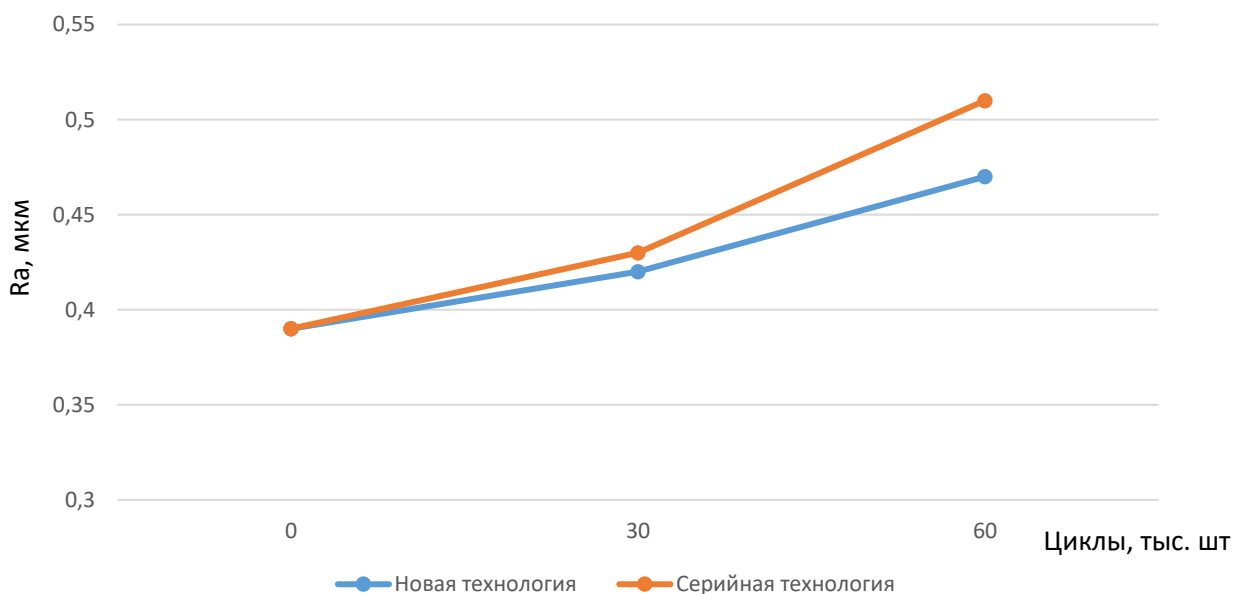


Рисунок 4.36 – Изменение шероховатости Ra на формообразующих поверхностях пресс-формы 1800–4076 в течении 60 тыс. циклов работы пресс-формы

В результате среднего износа и среднего изменения шероховатости на тысячу циклов пресс-формы, исходя из предъявляемых требований, можно определить ресурс пресс-форм для случая применения ТНФМ и обработки формообразующих поверхностей по серийной технологии, не учитывающей направление

макрорельефа (таблица 4.12). Гистограмма изменения ресурса изготовленных пресс-форм в результате применения новой технологии направленного формирования макрорельефа при фрезеровании формообразующих поверхностей пресс-форм показано на рисунке 4.37.

Таблица 4.12 – Определение ресурса изготовленных пресс-форм

Пресс-форма	Метод обработки	Ресурс по допустимому износу, тыс. циклов	Ресурс по допустимой шероховатости, тыс. циклов
1800–4103	ТНФМ	200	240
	Серийная технология	108,69	109,1
0606–1022	ТНФМ	172,41	230
	Серийная технология	108,69	176,92
1800–4064	ТНФМ	303	416,6
	Серийная технология	200	208,33
1800–4076	ТНФМ	487,8	961,53
	Серийная технология	266,66	625

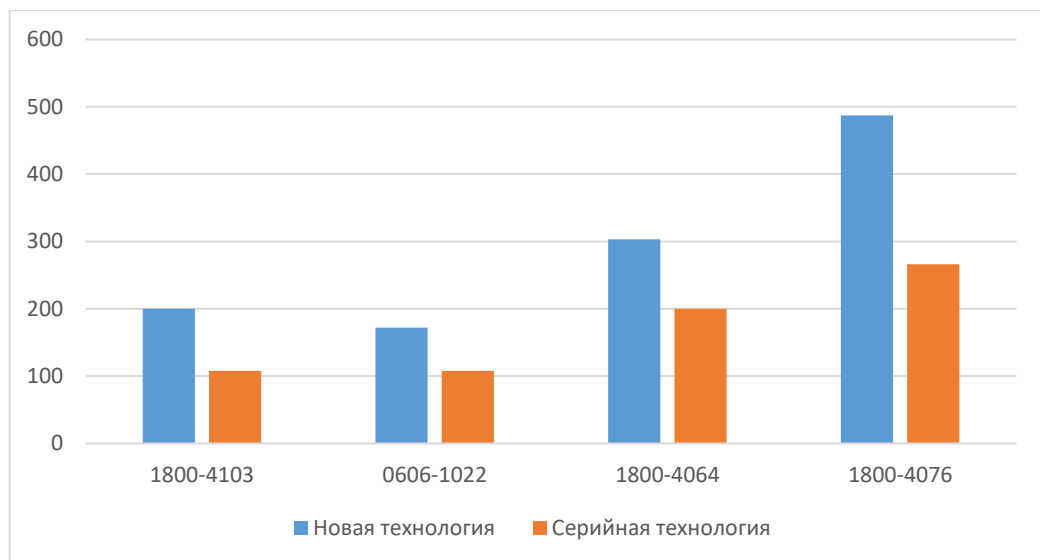


Рисунок 4.37 – Изменение ресурса изготовленных пресс-форм в результате применения новой технологии направленного формирования макрорельефа при фрезеровании формообразующих поверхностей пресс-форм

В результате замеров выявлено, что применение метода направленного формирования макрорельефа позволяет увеличить производительность цикла литья до 25 %, снизить износ формообразующих поверхностей на 45 % и увеличить износостойкость пресс-форм. Экспериментально доказано положительное влияние применения метода направленного формирования макрорельефа на изнашиваемость формообразующих поверхностей и производительность технологического процесса литья. Отклонение полученных данных в результате экспериментальных исследований при фрезеровании формообразующих поверхностей пресс-форм от теоретического анализа моделирования процесса формообразования макрорельефа составляет не более 7 %. Таким образом, проведенные теоретические исследования и сформулированные рекомендации можно считать адекватными.

#### 4.5 Выводы по 4 главе

1. Произведено математическое моделирование движения течения расплава для 38 деталей из ПКМ для определения главных векторов течения расплава относительно точки инъекции.

2. Проведен полный факторный эксперимент определения функциональной связи шероховатости обрабатываемой поверхности от назначаемых режимов фрезерования формообразующих поверхностей сталей 38ХНМ и 40Х13. Получены эмпирические математические модели, используя которые назначены режимы фрезерования для формообразующих поверхностей пресс-форм.

3. Определена зависимость высоты макрорельефа при обработке формообразующих поверхностей от кривизны обрабатываемой поверхности –  $\rho$ , шага поперечной подачи –  $\Delta S$  и радиуса обрабатывающего инструмента –  $R_{фр}$ , а также зависимость величины времени заполнения полостей пресс-форм от направления макрорельефа –  $\alpha$ , высоты макрорельефа –  $R$  и величины шероховатости –  $R_a$  для различных коэффициентов подобия  $k$ .

4. Разработаны управляющие программы для станков с ЧПУ для фрезерования формообразующих поверхностей пресс-форм по траектории, формирующей рациональный макрорельеф, в соответствии с теоретическими рекомендациями, изложенными во второй главе.

5. Изготовлены 38 формообразующих деталей пресс-форм для изделий из ПКМ по технологии направленного формирования макрорельефа при фрезеровании. В процессе получения деталей из ПКМ проведены замеры производительности цикла литья, износа и шероховатости формообразующих поверхностей.

6. Выявлено, что применение технологии направленного формирования макрорельефа при фрезеровании позволяет увеличить производительность цикла литья до 25 % и снизить износ деталей пресс-форм на 45 %.

## **Глава 5. Разработка технологических рекомендаций по внедрению новой технологии фрезерования для создания рационального макрорельефа на формообразующих поверхностях литейных пресс-форм**

### **5.1 Разработка алгоритма выбора рациональной траектории фрезерования для формообразующих поверхностей пресс-форм**

В процессе проектирования изделий из ПКМ и пресс-форм, при обработке формообразующих деталей и поверхностей, в процессе литья под давлением в пресс-формы, а также при эксплуатации самих изделий из ПКМ перед технологом стоит задача по повышению производительности технологического цикла литья, обеспечению износостойкости пресс-форм и выполнению предъявляемых требований по точности и качеству как формообразующих деталей и поверхностей пресс-форм, так и деталей из ПКМ. Одним из путей решения является применение новой технологии направленного формирования макрорельефа при фрезеровании. Для получения положительного эффекта от внедрения необходимо разработать алгоритм выбора рациональной траектории фрезерования в зависимости от геометрических параметров обрабатываемой формообразующей поверхности.

При изготовлении пресс-форм рациональная траектория обработки формообразующих деталей влияет на величину шероховатости, высоту и направление макрорельефа на формообразующей поверхности, износ формообразующей поверхности, производительность технологического процесса литья, который, в свою очередь, зависит от времени заполнения пресс-формы, остаточного давления и времени охлаждения.

Для разработки алгоритма по выбору траектории обработки для создания рационального макрорельефа формообразующих поверхностей необходимо проанализировать 3D-модель детали, назначенную точку инъекции и провести математическое моделирование процесса движения расплава с целью определения главных векторов течения расплава в детали.

Затем, исходя из геометрических особенностей детали и расположения точки инъекции, разделить формообразующие поверхности на простейшие полости и упростить их, исключив скругления, а также определить коэффициенты подобия для каждой простейшей поверхности. После определения коэффициентов подобия назначить угол  $\alpha$ , определяющий направление создания макрорельефа при фрезеровании.

Также требуется проанализировать геометрические параметры пресс-формы, в частности минимальный радиус скругления, для выбора инструмента и назначения режимов фрезерования, таким образом на этом этапе определяется диаметр инструмента  $D$ , скорость  $V$ , подача  $S$ , глубина резания  $t$ , кривизна обрабатываемой поверхности –  $\rho$  и шаг поперечной подачи –  $\Delta S$ , что определяет высоту макрорельефа и величину шероховатости, формируемую в процессе операции фрезерования.

На основе вышеперечисленных параметров разрабатываются управляющие программы в САМ-системе Unigraphics NX. Выбираются необходимые для обработки поверхности и на каждую отдельно накладывается траектория движения инструмента с выбранными режимами механической обработки и рациональным углом направления макрорельефа.

По разработанным управляющим программам производится обработка формообразующих поверхностей деталей пресс-форм на многофункциональных фрезерных станках с ЧПУ.

Таким образом, получена методика по выбору траектории фрезерования, обеспечивающей формирование рационального макрорельефа формообразующих поверхностей при фрезеровании на станках с ЧПУ, с целью повышения износостойкости пресс-форм, а также повышения производительности технологического процесса литья. Полученная методика представлена в виде алгоритма, который представляет собой технологические рекомендации для технологов при подготовке производства пресс-форм (рисунок 5.1).

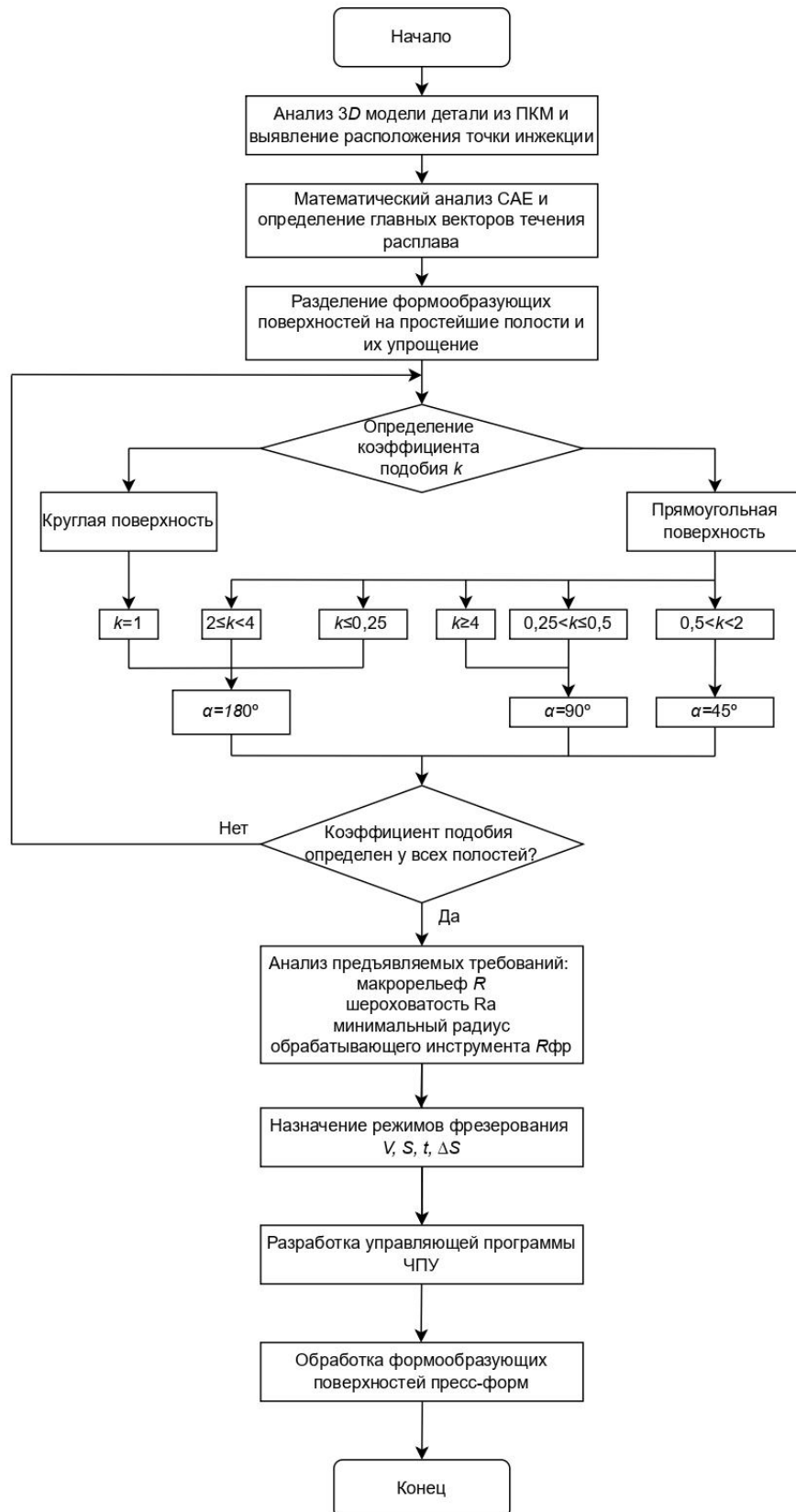


Рисунок 5.1 – Алгоритм разработки управляющей программы фрезерования при технологической подготовке производства пресс-форм по технологии направленного формирования макрорельефа

Операция фрезерования представляет собой последовательность переходов и последовательность их выполнения, от которых зависит результат повышения износостойкости пресс-форм и качества формообразующих поверхностей. Обработку формообразующих поверхностей пресс-форм можно осуществлять концевыми фрезами разного диаметра, задавая различную высоту макрорельефа, в зависимости от предъявляемых требований. Выбранные геометрические параметры обрабатывающего инструмента и высота гребешка будут задавать входные параметры для формирования высоты макрорельефа, величины шероховатости и выбора режимов резания, а направление макрорельефа, в свою очередь, будет зависеть от траектории обработки.

Данный алгоритм применяется в производственных условиях, по алгоритму производится обработка формообразующих поверхностей пресс-форм. В результате использования снижается износ произведенных пресс-форм на 45 % и увеличивается производительность процесса литья на 20–25 %, что позволяет снизить себестоимость конечного изделия на 20–30 %.

## **5.2 Результаты практической реализации новой технологии фрезерования пресс-форм на предприятиях**

Результаты исследований программирования рациональной траектории коллинеарной главному вектору течения расплава, для увеличения износостойкости и повышения качества формообразующих поверхностей пресс-форм путем фрезерования на станках с ЧПУ концевыми радиусными фрезами были предложены для реализации на предприятиях, занимающихся производством пресс-форм и штамповой оснастки.

Для внедрения метода направленного формирования макрорельефа на предприятия, занимающиеся производством индивидуальных пресс-форм и штампов и литьем изделий из ПКМ, ООО «ПК ДЭМИ» и ООО «Пермский крепеж» внесены изменения в технологический процесс обработки пресс-форм. Акт внедрения представлен в Приложении 2.



Для изготовления 38 пресс-форм для литья под давлением изделий из ПКМ на предприятия передан алгоритм по построению и выбору рациональной траектории фрезерования формообразующих деталей пресс-форм в зависимости от главного вектора течения расплава, определенного на основе математического моделирования процесса движения расплава в зависимости от геометрических особенностей детали и характеристик литниковой системы, позволяющий увеличить износостойкость изготавливаемых пресс-форм, повысить качество обрабатываемых формообразующих поверхностей и увеличить производительность технологического цикла литья.

Применение технологии направленного формирования макрорельефа при фрезеровании на предприятиях «ПК ДЭМИ» и «Пермский крепеж» позволило снизить износ пресс-форм до 45 %, повысить производительность процесса литья до 25 % и снизить себестоимость конечного изделия на 20–30 %. В пресс-формах, изготовленных по ТНФМ, произведено более 9 миллионов деталей за 2015–2021 годы. Годовой экономический эффект от внедрения составляет 15 млн руб.

Результаты работы были использованы при выполнении Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (N FSNM-2020-0026) и внедрены в учебный процесс ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» при подготовке студентов по дисциплинам «Технология машиностроения» и «Резание материалов». Акт внедрения представлен в Приложении 3.

### **5.3 Экономическая оценка эффективности внедрения новой технологии направленного формирования макрорельефа при фрезеровании на формообразующих поверхностях**

В результате внедрения метода направленного формирования макрорельефа на производстве с использованием алгоритма годовой экономический эффект Э (руб.) рассчитывается по формуле [50; 54; 145; 151; 152]:

$$\Delta = \left( (C_1 + E_n K_1) \frac{1}{T_1 + E_n} - (C_2 + E_n K_2) \right) A, \quad (5.1)$$

где  $C_1$  – средняя стоимость единицы продукции до внедрения;

$C_2$  – средняя стоимость единицы продукции после внедрения;

$K_1$  - капитальные вложения в оборудование и технологическое обеспечение до внедрения;

$K_2$  - капитальные вложения в оборудование и технологическое обеспечение после внедрения;

$T_1$  – средний срок службы формообразующих деталей при старой технологии;

$T_2$  – средний срок службы формообразующих деталей при старой технологии;

$E_n$  – нормативный коэффициент, принимаемый равным 0,15;

$A$  – годовой объем продукции.

Средняя стоимость единицы продукции из полимерных композиционных материалов при обработке формообразующих поверхностей по серийной технологии составляет  $C_1 = 71$  руб. При использовании технологии направленного формирования макрорельефа, предусматривающего выбор режимов резания и выбор рациональной траектории фрезерования, снижение себестоимости составит 15 %. Таким образом, средняя стоимость единицы продукции  $C_1 = 61$  руб.

Изготовление деталей пресс-форм по серийной технологии обеспечивает средний срок службы формообразующих поверхностей  $T_1 = 13$  месяцев, при использовании технологии направленного формирования макрорельефа средний срок службы увеличивается на 40 %, что составляет  $T_2 = 18$  месяцев.

Капитальные вложения в оборудование отсутствуют, так как для применения технологии нет необходимости использовать новое технологическое оборудование. Вложения в технологическое обеспечение возрастают вследствие увеличения времени технологической подготовки производства, необходимость математического моделирования, анализа изготавливаемой детали и выбор

рациональной траектории увеличивают вложения на 15–17 %. Таким образом, при базовых затратах на единицу продукции  $K_1 = 5$  руб. капитальные вложения в оборудование и технологическое обеспечение на единицу продукции  $K_2 = 6$  руб.

Средний объем выпуска изделий из полимерных композиционных материалов  $A = 900\,000$  шт., согласно выражению (5.1) годовой экономический эффект составит  $\mathcal{E} = 15$  млн руб. При увеличении объема выпуска изделий возрастает годовой экономический эффект (таблица 5.1)

Таблица 5.1 – Годовой экономический эффект в зависимости от увеличения объема выпуска изделий

Параметр	Значение		
Объем выпуска, шт	900 000	1 500 000	2 500 000
Годовой экономический эффект, руб	15 000 000	25 000 000	43 000 000

#### **5.4 Перспективные направления дальнейшего развития применения новой технологии направленного фрезерования формообразующих поверхностей**

Данную тему можно продолжать, изучая другие траектории фрезерования, используя другие режущие инструменты, другие полимерно-композиционные материалы, однако проведенное исследование является полным и достоверным благодаря большой базе изготовленных пресс-форм и значительному количеству полученных изделий из ПКМ. Технология направленного формообразования макрорельефа при фрезеровании имеет ряд перспективных направлений развития, представленных на рисунке 5.2.

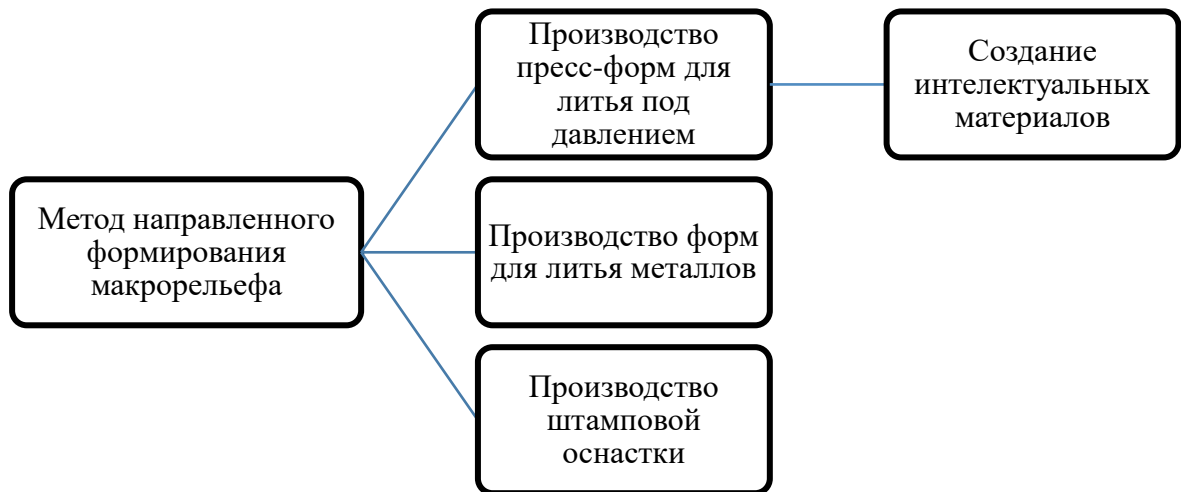


Рисунок 5.2 – Перспективные направления развития применения ДНФМ

Данную технологию направленного формирования макрорельефа при фрезеровании возможно использовать не только для литья деталей из ПКМ. Заполнение формы металлом также является приоритетным видом получения деталей сложной геометрической формы, в отличие от литья на термопластавтоматах, литье металла осуществляется под более высоким давлением, что помогает материалу принимать даже самую сложную конфигурацию литьевой формы. Такой метод литья металлов требует особенно прочных и износостойких форм.

Также технологию направленного формирования макрорельефа можно использовать для производства штамповой оснастки. Так как в штампах происходит процесс пластического деформирования металла, следствием этого является интенсивное изнашивание формообразующих поверхностей штампов. Штампы работают в условиях высоких переменных нагрузок и часто выходят из строя из-за хрупкого разрушения и износа. Поэтому стали, используемые для изготовления штампов, пластически деформирующих металл, должны обладать высокой твердостью, износостойкостью и прочностью. Применение ДНФМ может повысить износостойкость штампов, что позволит избежать искажения сложной конфигурации штампа во время эксплуатации и доводки штампа до требуемых размеров во время ремонта.

Использование ТНМФ позволяет в некоторой степени задать направление течения расплава в пресс-форме, а значит и направление армирующих волокон ПКМ в изделии во время технологического цикла литья, что дает возможность создавать интеллектуальные материалы с заданными физико-механическими свойствами в зависимости от прикладываемой к детали нагрузки. Применение такого метода направленного формирования волокон позволит выбирать менее дорогостоящие материалы и обеспечить высокую прочность конструкций, создаваемых из полимерно-композиционных деталей.

Использование новой технологии направленного формирования макрорельефа при фрезеровании формообразующих пресс-форм возможно в таких отраслях машиностроения, как транспорт, авиастроение, приборостроение, радиотехника, электроника, строительство, медицина и др.

## **5.5 Выводы по пятой главе**

1. Разработан алгоритм по выбору траектории фрезерования, обеспечивающей формирование рационального макрорельефа формообразующих поверхностей при фрезеровании на станках с ЧПУ, с целью повышения качества и износостойкости пресс-форм, а также повышения производительности технологического процесса литья.

2. Внесены изменения в технологию обработки пресс-форм на предприятии ООО «ПК ДЭМИ». Изготовлено 38 пресс-форм по технологии направленного формирования макрорельефа.

3. Практические эксперименты подтвердили достоверность теоретического моделирования и гипотезу; при сравнении результатов обработки 38 пресс-форм по технологии направленного формирования геометрии установлено, что применение алгоритма обеспечило снижение износа произведенных пресс-форм на 45 % и увеличило производительность процесса литья на 20–25 %, это позволило снизить себестоимость конечного изделия на 20–30 %. Годовой экономический эффект от внедрения составил 15 млн руб.

## Заключение

Решена научная задача повышения износостойкости пресс-форм, повышения производительности технологического цикла и повышения качества изделий из полимерных композиционных материалов для различных областей машиностроения, что позволяет снизить себестоимость изготавливаемых изделий и повысить конкурентоспособность российских предприятий на мировом рынке.

1. В результате проведенного анализа литературы и опыта предприятий установлено влияние траектории обработки и формируемого при этом макрорельефа на износостойкость формообразующих поверхностей и время заполнения пресс-форм.

2. Проведено математическое моделирование процесса заполнения полостей с помощью программы SolidWorks, с целью установления зависимости времени заполнения пресс-формы от макрорельефа формообразующей поверхности. В процессе моделирования различных схем обработки по траектории с различным углом по отношению к главному вектору течения расплава установлено, что направление макрорельефа на формообразующих поверхностях влияет на такие параметры технологического цикла, как время заполнения и время охлаждения в пресс-форме. Получено подтверждение, что наименьшее время заполнения пресс-формы происходит при траектории фрезерования, направленной под рациональным углом к главному вектору течения расплава. Рациональным углом  $\alpha$  для поверхностей с коэффициентом подобия  $k \leq 0,25$  и  $2 \leq k < 4$  будет являться угол  $\alpha = 180^\circ$ , для поверхностей с коэффициентом подобия  $0,25 < k \leq 0,5$  и  $k \geq 4$  рациональный угол  $\alpha = 90^\circ$ , а для  $0,5 < k < 2$  –  $\alpha = 45^\circ$ . При рациональном направлении макрорельефа наблюдается уменьшение времени заполнения пресс-формы на 25 %.

3. Разработана методика экспериментальных исследований процесса фрезерования формообразующих поверхностей пресс-форм в лабораторных и производственных условиях, учитывающая влияние геометрических параметров деталей пресс-форм при составлении управляющих программ для станков с ЧПУ с целью повышения износостойкости формообразующих поверхностей пресс-форм.

4. Для проведения экспериментальных исследований изготовлены 38 наименований пресс-форм различных размеров и форм и проведены сравнительные исследования на износостойкость пресс-форм, установлено, что производительность технологического цикла увеличилась на 25 %, снизился износ формообразующих поверхностей на 45 %, в результате чего снизилась себестоимость конечного изделия на 20–30 %. В результате проведенных исследований получено подтверждение влияния получаемого при фрезеровании макрорельефа на износ формообразующих поверхностей деталей пресс-форм и производительность технологического цикла изготовления деталей из полимерных композиционных материалов различного размера.

5. Получены эмпирические математические модели, устанавливающие следующие зависимости:

– высоты макрорельефа от кривизны поверхности, величины поперечной подачи при фрезеровании и радиуса фрезы при обработке криволинейных сложных поверхностей;

– времени заполнения полостей от угла направления макрорельефа, высоты макрорельефа и шероховатости обрабатываемой поверхности;

– шероховатости от скорости резания, подачи и глубины резания при обработке пресс-форм из закаленных сталей 40Х13 и 38ХНМ.

На основании зависимостей выбраны режимы фрезерования для сферической монолитной фрезы –  $V=150$  м/мин;  $S_o=0,3$  мм/об;  $t=0,2$  мм для обеспечения требуемой шероховатости, высота макрорельефа  $R$  и шаг поперечной подачи  $\Delta S$  для каждой из рассматриваемых полостей и применены для обработки формообразующих деталей пресс-форм.

6. Разработан алгоритм для составления управляющих программ для фрезерования на станке с ЧПУ с учетом размеров и форм поверхностей, необходимой величины шероховатости на формообразующих поверхностях и направления траектории фрезерования, которая обеспечивает рациональный макрорельеф на формообразующих поверхностях деталей пресс-форм.

7. Результаты работы в виде технологических рекомендаций внедрены на предприятии ООО «ПК ДЭМИ» и ООО «Пермский крепеж», г. Пермь, при производстве 38 наименований пресс-форм. Применение новой технологии направленного формирования рационального макрорельефа обеспечило снижение износа произведенных деталей пресс-форм на 45 % и увеличило производительность на 25 %, что позволило снизить себестоимость производимых конечных изделий на 20–30 %. При эксплуатации пресс-форм за 2015–2022 г.г. произведено более 9 млн деталей, при этом годовой экономический эффект от внедрения составил 15 млн руб. Результаты исследования внедрены в учебный процесс ПНИПУ при изучении дисциплин «Технология машиностроения» и «Резание материалов».



## Список литературы

1. Автоматизация проектирования технологии в машиностроении / Б. Е. Челищев, И. В. Боброва, А. Гонсалес-Саббатер; под редакцией академика Н. Г. Бруевича. – Москва: Машиностроение, 1987. – 264 с. – Текст: непосредственный.
2. Автоматизированные электроэрозионные станки / В. Ф. Иоффе [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1984. – 117 с. – Текст: непосредственный.
3. Адаптивное управление технологическими процессами (на металлорежущих станках) / Ю. М. Соломенцев, В. Г. Митрофанов, С. П. Протопопов [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1980. – 536 с. – Текст: непосредственный.
4. Азотирование и карбонитрирование / Р. Чаттерджи-Фишер [и др.]; под редакцией А. М. Супова. – Москва: Металлургия, 1990. – 280 с. – Текст: непосредственный.
5. Амитан, Г. Л. Справочник по электрохимической и электрофизической методам обработки / Г. Л. Амитан. – Москва: Машиностроение, 1988. – 718 с. – Текст: непосредственный.
6. Анализ моделей процессов электрохимической и электрофизической обработки. Том II. Обработка материалов с использованием высококонцентрированных источников энергии / Б. А. Артамонов [и др.]. – Москва: Высшая школа, 1991. – 208 с. – Текст: непосредственный.
7. Андрейчик, М. А. Некоторые аспекты технического наводороживания металлов и его влияние на износостойкость / М. А. Андрейчик, В. Я. Матюшенко // Долговечность трущихся деталей машин. – 1986. – № 1. – С. 191–195. – Текст: непосредственный.
8. Андрейчиков, Б. И. Динамическая точность систем программного управления станками. – Москва : Машиностроение, 1964. – 365 с.
9. Арморего, И. Дж. А. Обработка металлов резанием / И. Дж. А. Арморего, Р. Х. Браун. – Москва: Машиностроение, 1977. – 323 с. – Текст: непосредственный.

10. Балакшин, Б. С. Автоматизация управления технологическим процессом с целью повышения точности и производительности обработки / Б. С. Баклашкин // Самоподнастраивающиеся станки. – Москва: Машиностроение, 1970. – С. 7–50. – Текст: непосредственный.
11. Барвинский, И. А. Компьютерный анализ литья пластмасс: принципы эффективности / И. А. Барвинский. – Москва: САПР и графика, 2012. – С. 25–29. – Текст: непосредственный.
12. Батуев, В. А. Исследование особенностей процесса объемного фрезерования на станках с ЧПУ с целью повышения качества управляющих программ / В. А. Батуев // Автоматизация программирования и организация участков станков с ЧПУ; тез. докл. науч.-техн. конф., Челябинск, декабрь 1982 г. – Челябинск: б. и., 1982. – С. 5–6. – Текст: непосредственный.
13. Батуев, В. А. Обеспечение точности чистового фрезерования пространственно-сложных поверхностей с учетом влияния стратегий черновой обработки / В. А. Батуев, В. В. Батуев // Актуальные проблемы конструкторско-технологического обеспечения машиностроительного производства: сборник материалов международной научной конференции. – Волгоград, 2003. – С. 60–63. – Текст: непосредственный.
14. Батуев, В. А. Обработка пространственно-сложных поверхностей на фрезерных станках с ЧПУ с учетом ограничений по точности / В. А. Батуев // Пути повышения технического уровня и конкурентоспособности малогабаритных металлорежущих станков с числовым программным управлением: тезисы докладов научно-технической конференции, Каунас, 21–22 апреля 1983 г. – Каунас: Б.и., 1983. – С. 46. – Текст: непосредственный.
15. Батуев, В. А. Повышение производительности и точности фрезерования пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ путем стабилизации сил резания: дис. канд. техн. наук / Виктор Анатольевич Батуев. – Саратов: Саратовский политехнический институт, 1986. – 248 с. – Текст: непосредственный.

16. Баурова, Н. И. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин: учебное пособие / Н. И. Баурова, В. А. Зорин. – Москва: МАДИ, 2016. – 264 с. – Текст: непосредственный.
17. Безъязычный, В. Ф. Математическое обеспечение выбора технологических условий обработки, обеспечивающих заданное качество механической обработки. Информационное и технологическое обеспечение качества и эффективности механической обработки // Сборник трудов АнАТИ. – Ярославль: ЯПИ, 1985. – Текст: непосредственный.
18. Безъязычный, В. Ф. Расчет режимов резания: учебное пособие / В. Ф. Безъязычный, И. Н. Аверьянов, А. В. Кордюков. – Рыбинск: РГАТА, 2009. – 185 с. – Текст: непосредственный.
19. Безъязычный, В. Ф. Расчет режимов резания: учебное пособие / В. Ф. Безъязычный, И. Н. Аверьянов, А. В. Кордюков. – Рыбинск: РГАТА, 2009. – 185 с. – Текст: непосредственный.
20. Березин, Д. Т. Повышение эксплуатационной стойкости пресс-форм литья под давлением на основе теплонапряженного состояния и моделирования процессов термоусталостного разрушения: автореф. дис. канд. техн. наук / Дмитрий Тимофеевич Березин. – Рыбинск, 2002. – 28 с. – Текст: непосредственный.
21. Биленко, С. В. Повышение эффективности высокоскоростной механической обработки на основе подходов нелинейной динамики и нейронно-сетового моделирования: дис. д-ра техн. наук / Сергей Владимирович Биленко. – Комсомольск-на-Амуре, 2006. – Текст: непосредственный.
22. Бихлер, М. Детали из пластмасс – отливать без дефектов / М. Бихлер. – Гейдельберг: Цехнер, Шпейер, 1999. – 112 с. – Текст: непосредственный.
23. Бобров, В. Ф. Основы теории резания материалов / В. Ф. Бобров. – Москва : Машиностроение, 1975. – 344 с. – Текст: непосредственный.
24. Бойко, А. Ф. Точный метод расчета необходимого количества повторных опытов / А. Ф. Бойко, Е. Ю. Куденков // Вестник Белгородского

- государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2016. – № 8. – С. 128–132. – Текст: непосредственный.
25. Бородин, И. Н. Упрочнение деталей композиционными покрытиями / И. Н. Бородин. – Москва: Машиностроение, 1982. – 142 с. – Текст: непосредственный.
  26. Бурыкин, В. В. Технология изготовления и повышение стойкости вырубных пуансонов / В. В. Бурыкин, А. В. Хандожко, А. О. Горленко // Технологическое повышение надежности и долговечности деталей машин и инструментов: сборник научных трудов. – Брянск, 1990. – С. 110–116. – Текст: непосредственный.
  27. Ведмидь, П. А. Программирование обработки в NX CAM / П. А. Ведмидь, А. В. Сулинов. – Москва: ДМК Пресс, 2014. – 304 с. – Текст: непосредственный.
  28. Владимиров, В. М. Изготовление штампов, пресс-форм и приспособлений: учебник / В. М. Владимиров. – Москва: Высшая школа, 1974. – 431 с.
  29. Выбойщик, А. В. Повышение точности и производительности фрезерования пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ: дис. канд. техн. наук / А. В. Выбойщик – Челябинск: ЮУрГУ, 2000. – 181 с. – Текст: непосредственный.
  30. Вэй, Пью Маунг. Программирование обработки деталей сложного профиля на станках с ЧПУ с использованием САМ систем / Пью Маунг Вэй // Научные труды международной научной конференции «Гагаринские чтения». – Т. 3. – Москва: МАТИ, 2012. – С. 47–48. – Текст: непосредственный.
  31. Вэй, Пью Маунг. Технологические особенности фрезерования на станках с ЧПУ с использованием концевых фрез / Пью Маунг Вэй // Современные технологии в горном машиностроении» в рамках недели горняка: семинар. – 2013. – С. 278–282. – Текст: непосредственный.
  32. Гавариев, Р. В. Проблема прогнозирования эксплуатационного ресурса пресс-форм литья под давлением цинковых сплавов и некоторые пути ее разрешения / Р. В. Гавариев, И. О. Леушин, И. А. Савин // Справочник. Инженерный журнал. – Москва, 2013. – № 6. – Текст: непосредственный.

33. Гайгал, И. В. Исследование точности и производительности контурного фрезерования основных отверстий на многоцелевых станках: автореф. дис. канд. техн. наук / Ирина Владимировна Гайгал. – Москва, 1975. – 16 с. – Текст: непосредственный.
34. Гастров, Г. Конструирование литьевых форм в 130 примерах / Г. Гастров, Э. Линднер, П. Унгер. – Санкт-Петербург: Профессия, 2006. – 336 с.
35. Горюнов, И. И. Пресс-формы для литья под давлением: справочное пособие / И. И. Горюнов. – Ленинград: Машиностроение, 1973. – 256 с. – Текст: непосредственный.
36. ГОСТ 14901-93. Пресс-формы для изготовления резинотехнических изделий. Общие технические условия. – Москва: ИПК Изд-во стандартов, 2005. – 13 с. – Текст: непосредственный.
37. ГОСТ 16263-70. Метрология. Термины и определения. – Москва: Изд-во стандартов, 1970. – 56 с. – Текст: непосредственный.
38. ГОСТ 22062-76. Пресс-формы-заготовки с плитой выталкивателей для литья термопластов под давлением. Конструкция и размеры. – Москва: Изд-во стандартов, 1987. – 66 с. – Текст: непосредственный.
39. ГОСТ 22064-76. Пресс-формы-заготовки с плитой съема и плитой выталкивателей для литья термопластов под давлением. Конструкция и размеры. – Москва: Изд-во стандартов, 1977. – 26 с. – Текст: непосредственный.
40. ГОСТ 22082-76. Пресс-формы-заготовки, детали-заготовки и детали пресс-форм для литья термопластов под давлением. Технические условия. – Москва: Изд-во стандартов, 1977. – 6 с. – Текст: непосредственный.
41. ГОСТ 24026-80. Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения. – Москва: Изд-во стандартов, 1980. – 14 с. – Текст: непосредственный.
42. ГОСТ 25142-82. Шероховатость поверхности. Термины и определения. – Утв. и введ. 1983-01-01, № 730. – Москва: Издательство стандартов, 1982. – 20 с. – Текст: непосредственный.

43. ГОСТ 27358-87. Пресс-формы для изготовления изделий из пластмасс. – Москва: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 16 с. – Текст: непосредственный.
44. ГОСТ Р ИСО/ТО 10017-2005. Статистические методы. Руководство по применению в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001. – Москва: Стандартинформ, 2005. – Текст: непосредственный.
45. Гузеев, В. И. Теория и методика производительности контурной обработки деталей разной точности на токарных и фрезерных станках с ЧПУ: дис. д-ра техн. наук / Виктор Иванович Гузеев. – Челябинск: ЧГТУ, 1994. – 517 с. – Текст: непосредственный.
46. Гузеев, В. И. Учет влияния следов предшествующей обработки на точность фрезерования пространственно-сложных поверхностей / В. И. Гузеев, В. В. Батуев // Прогрессивные технологии в машиностроении: сборник научных трудов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. – С. 112-117. – Текст: непосредственный.
47. Гурьянихин, В. Ф. Автоматизированная подготовка управляющих программ для станков с ЧПУ: учебное пособие к практическим и лабораторным работам / В. Ф. Гурьянихин, М. Н. Булыгина. – Ульяновск : УлГТУ, 2001. – 88 с. – ISBN 5-89146-251-6. – Текст: непосредственный.
48. Гуткин, Б. Г. Автоматизация электроэрозионных станков / Б. Г. Гуткин. – Москва: Машиностроение, 1971. – 81 с. – Текст: непосредственный.
49. Дьячков, Ю. А. Моделирование технических систем. Лабораторный практикум. / Ю. А. Дьячков, И. П. Торопцев. – Пенза: ПГУ, 2012. – 112 с.
50. Иванов, И. Н. Экономика промышленного предприятия: учебник / И. Н. Иванов. – Москва: Инфра-М, 2011. – 393 с. – Текст: непосредственный.
51. Илларионов, И. Е. Методы повышения стойкости деталей машин и форм литья под давлением / И. Е. Илларионов, В. Е. Федоров // Литейное производство. – 1995. – № 4-5. – С. 49–50. – Текст: непосредственный.
52. Ильин, В. М. Повышение надежности инструмента лазерным легированием / В. М. Ильин, А. Н. Кравец // Вестник машиностроения. – 1987. – № 1. – С. 44–46.

53. Инженерия поверхности деталей / под редакцией А. Г. Сулова. – Москва: Машиностроение, 2008. – 320 с. – Текст: непосредственный.
54. Инструкция по определению экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений / Л. К. Десяткина, Л. Г. Злотникова, А. А. Калужский [и др.]. – Москва : Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, 1976. – 82 с. – Текст: непосредственный.
55. Калинин, Э. Л. Оборудование для литья пластмасс под давлением: расчет и конструирование / Э. Л. Калинин, Е. И. Калинин, М. Б. Саковцева. – Москва: Машиностроение, 1985. – 256 с. – Текст: непосредственный.
56. Калинин, Э. Л. Справочное пособие для эффективного литья пластмасс под давлением: технология, материалы, оснастка / Э. Л. Калинин. – Москва: Машиностроение, 1987. – 239 с. – Текст: непосредственный.
57. Караваева, Д. Н. Повышение стойкости рабочих элементов разделительных штампов / Д. Н. Караваева, В. П. Пучков // Технические науки – от теории к практике: сборник статей по материалам X Международной научно-практической конференции. – Новосибирск: СибАК, 2012. – С. 53-65. – Текст: непосредственный.
58. Каталог Iscar. Вращающийся инструмент. — 2008. – 1022 с. – Текст: непосредственный.
59. Каталог Iscar. Инновационный инструмент. – 2015. – 320 с. – Текст: непосредственный.
60. Каталог Iscar. Монолитный твердосплавный инструмент. – 2014. – 183 с. – Текст: непосредственный.
61. Каталог Iscar. Режущий инструмент в производстве штампов и пресс-форм. – 2011. – 164 с. – Текст: непосредственный.
62. Каталог Mitsubishi. Вращающийся инструмент. – 2016. – 1347 с. – Текст: непосредственный.

63. Каталог Sandvik Coromant. Вращающийся инструмент. – 2003. – 665 с. – Текст: непосредственный.
64. Каталог WIDIA. Tooling systems. – 2018. – 1305 с. – Текст: непосредственный.
65. Каталог WIDIA. Монолитные фрезы. – 2017. – 308 с. – Текст: непосредственный.
66. Кацев П. Г. Статистические методы исследования режущего инструмента / П. Г. Кацев. – 2-е изд. перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1974. – 231 с. – (Статистика). – Текст: непосредственный.
67. Каюмова, О. А. Технология плазменной обработки режущего инструмента / О. А. Каюмова, Р. Х. Охунова, М. Ж. Хамидова. – Текст: электронный // Молодой ученый. – 2017. – № 1. – С. 40-42. – URL: <https://moluch.ru/archive/135/37471/> (дата обращения: 11.06.2019).
68. Кербер, М. Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учебное пособие / М. Л. Кербер, В. М. Виноградов, Г. С. Головкин. – Санкт-Петербург: Профессия, 2008. – 560 с. – Текст: непосредственный.
69. Ковалькова, Е. А. Оптимизация процесса армирования полимерного композиционного материала по тензору ориентации / Е. А. Ковалькова, И. Н. Хаймович // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2, ч. 3. – Текст: непосредственный.
70. Кожевников, С. И. Анализ методов влияния на движение полимерных композиционных материалов при заполнении пресс-форм / С. И. Кожевников // Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований: сборник статей по материалам XLIII международной научно-практической конференции. – Новосибирск: СибАК, 2021. – № 9(35). – С. 4–9.
71. Кожевников, С. И. Влияние траектории обработки формообразующих поверхностей на износостойкость оснастки / С.И. Кожевников, В.Ф. Макаров. – Текст: электронный // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2018: материалы XXII Всероссийской научно-технической конференции / Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – Пермь: ПНИПУ, 2018. – С. 150–154.



72. Кожевников, С. И. Влияние траектории фрезерования на износостойкость пространственно-сложных поверхностей формообразующей оснастки / С. И. Кожевников, В. Ф. Макаров // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия Прогрессивные технологии в машиностроении. – 2017. – № 9(204). – С. 37–40. – Текст: непосредственный.
73. Кожевников, С. И. Выбор оптимальной технологии получения изделий из полимерных композиционных материалов / С. И. Кожевников, В. Ф. Макаров. – Текст: электронный // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2018: материалы XXII Всероссийской научно-технической конференции / Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – Текст: электронный. – Пермь: ПНИПУ, 2018. – С. 154–157.
74. Кожевников, С. И. Разработка программного управления на основе использования компьютерного моделирования конструкции изделия / С. И. Кожевников, В. Ф. Макаров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – Вып. 8, Ч. 1. – С. 84–89. – Текст: непосредственный.
75. Кожевников, С. И. Разработка управляющей программы для финишной обработки на основе технологических параметров производства изделия / С. И. Кожевников, В. Ф. Макаров // Перспективные направления развития финишных методов обработки деталей: виброволновые технологии : сборник трудов по материалам международного симпозиума технологов-машиностроителей (Ростов-на-Дону, 14–17 сент. 2016 г.). / М-во образования и науки Рос. Федерации, Дон. гос. техн. ун-т, Рос. фонд фундам. исслед. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2016. – С. 11–13. – Текст: непосредственный.
76. Кожевников, С. И. Системы автоматизированного проектирования и применение методов проектирования для повышения производительности в специальном машиностроении / С. И. Кожевников, В. Ф. Макаров // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2015: материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции (г. Пермь, 17–18 ноября 2015 г.) / М-во образования и науки Рос. Федерации, Пермский

- нац. исслед. политехн. ун-т. – Пермь : ПНИПУ, 2015. – С. 101–106. – Текст: непосредственный.
77. Кожевников, С.И. Влияние шероховатости поверхности на движение потока вязкой жидкости в пресс-формах / С. И. Кожевников, В. Ф. Макаров. – Текст: электронный // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2021: материалы XXII Всероссийской научно-технической конференции (18–20 ноября 2021 г.) / Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – Т. 2. – Пермь: ПНИПУ, 2021.
78. Кожевников, С.И. Исследование влияния стратегий фрезерования на долговечность пресс-форм / С. И. Кожевников, В. Ф. Макаров // Современные высокоэффективные технологии и оборудование в машиностроении (МТЕТ-2016). – Санкт-Петербург : [б. и.], 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – 7 с. – Загл. с экрана. – Текст: электронный.
79. Кожевников, С.И. Исследование влияния траектории фрезерования на износ поверхности пресс-форм при литье композиционных материалов / С. И. Кожевников, В. Ф. Макаров // Машиностроение и техносфера XXI века : сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции, 10–16 сентября 2018 г. в г. Севастополе / М-во образования и науки Донец. Нар. Респ., Междунар. союз машиностроителей, Донец. нац. техн. ун-т. – Т. 1. – Донецк : ДонНТУ, 2018. – С. 263–267. – Текст: непосредственный.
80. Кожевников, С.И. Повышение долговечности пресс-форм на основе направленного формирования шероховатости на формообразующей поверхности / С. И. Кожевников, В. Ф. Макаров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – Вып. 8, Ч. 1. – С. 254–261. – Текст: непосредственный.
81. Кожевников, С.И. Практические исследования влияния траектории фрезерования формообразующих поверхностей на износостойкость оснастки / С. И. Кожевников, В. Ф. Макаров // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2018. – № 6. – С. 110–113.

82. Кожевников, С.И. Теоретические исследования влияния траектории фрезерования формообразующих поверхностей на износостойкость оснастки / С. И. Кожевников, В. Ф. Макаров // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2018. – № 6. – С. 117-120.
83. Кожевников, С.И. Технологическое обеспечение повышения качества литьевых изделий в пресс-формах путем формирования рационального микрорельефа на формообразующих поверхностях / С. И. Кожевников, В. Ф. Макаров // Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоемких технологических систем формообразования и сборки изделий : сборник трудов научного симпозиума технологов-машиностроителей / под редакцией В. А. Лебедева ; Донской государственный технический университет. – Текст: электронный. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2021. – 460 с.
84. Козаченко, Н. И. Новые конструкции пресс-форм для литья под давлением изделий из полимерных материалов / Н. И. Козаченко, Е. И. Павлов, Л. М. Данюшин // Известия вузов. северо-кавказский регион. Технические науки. – 2014. – № 2. – С. 56–60. – Текст: непосредственный.
85. Козлобородов, А. Н. Численное исследование процесса заполнения цилиндрических пресс-форм полимерной массой методом литья под давлением / А. Н. Козлобородов // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310, № 2. – С. 172-177. – Текст: непосредственный.
86. Комбалов, В. С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ / В. С. Комбалов. – Москва: Наука, 1974. – 111 с. – Текст: непосредственный.
87. Корсаков, В. С. Основы технологии машиностроения / В. С. Корсаков. – Москва: Высшая школа, 1974. – 335 с. – Текст: непосредственный.
88. Корчак, С. Н. Аналитический метод расчета эквидистанты с учетом точности при фрезеровании пространственно-сложных поверхностей на трехкоординатных станках с ЧПУ / С. Н. Корчак, А. А. Кошин, В. А. Батуев // Вопросы конструирования и эксплуатации станков с ЧПУ и промышленных роботов, перспективы их развития: тезисы докладов республиканской научно-

- технической конференции, Ереван, 12–14 мая. 1981. – Ереван: б.и., 1981. – С. 101–102. – Текст: непосредственный.
89. Кузнецов, А. П. Оптимизация производственного процесса изготовления формообразующих деталей пресс-форм / А. П. Кузнецов, Б. А. Якимович // Машиностроитель. – 1997. – № 1. – С. 14-18. – Текст: непосредственный.
90. Курченко, В. И. Электроэрозионная и электрохимическая обработка / В. И. Курченко. – Москва: Машиностроение, 1967. – 108 с. – Текст: непосредственный.
91. Ландау, Л.Д. Гидродинамика. Теоретическая физика: в 10 т. Т 4 / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – 3-е изд. перераб. – М.: Наука, 1986. – 736 с.
92. Лапач, С. Н. Оптимизация режимов обработки жаропрочных никелевых сплавов инструментом из сверхтвердого материала. Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем / С. Н. Лапач. – Краматорск, 1997. – Текст: непосредственный.
93. Литовченко, А. К. Повышение точности и производительности обработки на фрезерных станках с программным управлением: дис. канд. техн. наук / Александр Константинович Литовченко. – Ленинград, 1979. – 231 с. – Текст: непосредственный.
94. Мавзутова, Г. Р. Применение средств UNIGRAPHICS NX для решения технологических задач / Г. Р. Мавзутова // Естественные и математические науки в современном мире: сборник статей по материалам XXXIII Международной научно-практической конференции. – Новосибирск: СибАК, 2015. – № 8(32). – Текст: непосредственный.
95. Макаров, В. Ф. Разработка управляющей программы для растрового фрезерования с применением методов гибкого программирования / В. Ф. Макаров, А. В. Пепельшев // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: материалы научно-технической конференции (22–24 мая 2013 г., г. Одесса) / Ассоциация Технологгов-машиностроителей Украины [и др.]. – Киев: АТМ Украины, 2013. – С. 110–113. – Текст: непосредственный.

96. Макаров, В. Ф. Растровый метод фрезерования на станках с ЧПУ / В. Ф. Макаров, А. В. Пепельшев // Инновации в машиностроении – основа технологического развития России: материалы VI Международной научно-технической конференции, 23–26 сентября 2014 г.: в 2 ч. / М-во образования и науки Рос. Федерации. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. – Ч. 1. – С. 222–225. – Текст: непосредственный.
97. Макаров, В. Ф. Резание материалов : учебник / В. Ф. Макаров. – Старый Оскол : Тонкие наукоемкие технологии, 2022. – 472 с. – Текст: непосредственный.
98. Макаров, В. Ф. Резание материалов: учебник / В. Ф. Макаров. – Пермь: ПНИПУ, 2009. – 363 с. – Текст: непосредственный.
99. Маталин, А. А. Технология машиностроения: учебник для машиностроительных специальностей вузов / А. А. Маталин. – Ленинград: Машиностроение, 1985. – 496 с. – Текст: непосредственный.
100. Маталин, А. А. Точность механической обработки и проектирование технологических процессов / А. А. Маталин. – Ленинград : Машиностроение, 1970. – 319 с. – Текст: непосредственный.
101. Маталин, А. А. Технология машиностроения / А. А. Маталин. – Санкт-Петербург: ЛАНЬ, 2010. – 512 с. – Текст: непосредственный.
102. Медведев, В. А. Проектирование оснастки для обработки штампов и пресс-форм / В. А. Медведев. – Москва: Машиностроение, 1982. – 175 с. – Текст: непосредственный.
103. Менгес, Г. Как делать литьевые формы / Г. Менгес, В. Микаэли, П. Морен. – Санкт-Петербург: Профессия, 2007. – 614 с. – Текст: непосредственный.
104. Мендельсон, В. С. Технология изготовления штампов и пресс-форм / В. С. Мендельсон, Л. И. Рудман. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1982. – 207 с. – Текст: непосредственный.
105. Михаленко, Ф. П. Стойкость разделительных штампов / Ф. П. Михаленко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1986. – 224 с. – Текст: непосредственный.

106. Мухачев, В. А. Планирование и обработка результатов эксперимента: учебное пособие / В. А. Мухачев. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 118 с. – Текст: непосредственный.
107. Мышкис, А. Д. Элементы теории математических моделей / А. Д. Мышкис. – 3-е изд., испр. – Москва: КомКнига, 2007. – 192 с. – Текст: непосредственный.
108. Мэллой, Р. А. Конструирование пластмассовых изделий для литья под давлением / перевод с английского; под редакцией В. А. Брагинского, Е. С. Цобкалло, Г. В. Комарова. – Санкт-Петербург: Профессия, 2006. – 512 с. – Текст: непосредственный.
109. Немилов, Е. Ф. Электроэрозионная обработка материалов / Е. Ф. Немилов. – Ленинград: Машиностроение, 1983. – 160 с. – Текст: непосредственный.
110. Орловский, Э. П. Стойкость пресс-форм для литья под давлением / Э. П. Орловский // Технология и оборудование литейного производства: сборник / ВНИТИ. – Москва, 1977. – № 6. – С. 31–35. – Текст: непосредственный.
111. Оссвальд, Т. А. Литье пластмасс под давлением / Т. А. Оссвальд, Л.-Ш. Тунг, П. Дж. Грэмманн. – Санкт-Петербург: Профессия, 2006. – 712 с. – Текст: непосредственный.
112. Палей, М. М. Технология производства приспособлений, пресс-форм и штампов / М. М. Палей. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1979. – 293 с. – Текст: непосредственный.
113. Пантелеев, А. П. Справочник по реконструированию оснастки для переработки пластмасс / А. П. Пантелеев, Ю. М. Швецов, И. А. Горячев. – Москва: Машиностроение, 1986. – 399 с. – Текст: непосредственный.
114. Патент 2514253(13), РФ. Способ упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием: опубл. 27.04.2014, Бюл. № 12. – Текст: непосредственный.
115. Платонов, В. В. Гибкий участок для обработки пресс-форм из закаленной стали с применением HSM-технологии / В. В. Платонов // Современная наука:

- актуальные проблемы и пути их решения, апрель, 2013. – 2013. – С. 21-24. – Текст: непосредственный.
116. Поверхностное упрочнение стальных деталей сжатой электрической дугой / А. Е. Михеев, А. В. Гирн, С. С. Ивсаев [и др.] // Сварочное производство. – 2003. – № 2. – С. 24–27. – Текст: непосредственный.
117. Повышение износостойкости и коррозионной стойкости изделий из конструкционных и инструментальных сталей путем нанесения ионно-плазменных покрытий / Л. Л. Ильичев, В. И. Рудаков, Г. В. Клевцов, Н. А. Клевцова // Современные проблемы науки и образования. – 2006. – № 6.
118. Повышение надежности и долговечности штампов для разделительных операций листовой штамповки / А. Я. Мовшович, Н. К. Резниченко, Ю. А. Черная [и др.] // Оборудование и инструмент для профессионалов. Серия: Металлообработка. – 2012. – № 5. – С. 232–236. – Текст: непосредственный.
119. Пономарев, Б. Б. Оценка шероховатости при пятикоординатном чистовом фрезеровании поверхностей сфероцилиндрической фрезой / Б. Б. Пономарев, Ш. Х. Нгуен // Известия высших учебных заведений. Машиностроение / Иркутский национальный исследовательский технический университет. – 2020. – № 5. – С. 21–31. – Текст: непосредственный.
120. Путинцев, И. Д. Повышение стойкости форм литья под давлением / И. Д. Путинцев, Ю. М. Эльшев, А. А. Ярослав // Литейное производство. – 1985. – № 6. – С. 23. – Текст: непосредственный.
121. Разработка и применение методики комплексного автоматизированного кинематического, динамического и прочностного анализа для решения задач машиностроения / А. М. Терлецкая, Н. Р. Райц, И. Г. Лимарева [и др.] // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2011. – № 6 (76). – С. 104-108. – Текст: непосредственный.
122. Райхельсон, В. А. Обработка резанием сталей, жаропрочных и титановых сплавов с учетом физико-механических свойств / В. А. Райхельсон. – Москва: Техносфера, 2018. – 508 с. – Текст: непосредственный.

123. Сальников, О. А. Погрешности обработки на станках с числовым программным управлением / О. А. Сальников // Станки и инструмент. – 1965. – № 6. – С. 25-27. – Текст: непосредственный.
124. Сарбанов, С. Т. Анализ структур операций фрезерования сложных поверхностей на станках с ЧПУ с целью повышения точности и производительности обработки: дис. канд. техн. наук / С. Т. Сарбанов. – Москва, 1978. – 184 с. – Текст: непосредственный.
125. Сборник методов поиска новых идей и решений управления качеством / составитель В. В. Ефимов. – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – 194 с. – Текст: непосредственный.
126. Седов, Л.И. Механика сплошной среды / Л.И. Седов. – 5-е изд. исп. – М.: Наука, 1994. – 528 с. – Текст: непосредственный.
127. Смыслов, А. М. Разработка и исследование технологических методов повышения фреттинг-стойкости рабочих лопаток из титановых сплавов / А. М. Смыслов, К. С. Селиванов // Вестник УГАТУ. – 2007. – Т. 9, № 1. – С. 77–83. – Текст: непосредственный.
128. Современные проблемы конструкторско-технологической подготовки машиностроительного производства: учебное пособие / С.В. Сергеев, Б.А. Решетников, Ю.С. Сергеев [и др.]. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – 143 с. – Текст: непосредственный.
129. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – Москва: Машиностроение, 1981. – 184 с. – Текст: непосредственный.
130. Справочник по электроэрозионной обработке материалов / Е. Ф. Немилов. – Москва: Машиностроение, 1989. – 146 с. – Текст: непосредственный.
131. Справочник технолога машиностроителя: в 2 т. / под редакцией А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – Москва: Машиностроение, 1986. – Т. 2. – 496 с. – Текст: непосредственный.
132. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под редакцией А. М. Дальского, А. Г. Сулова, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 5-е изд.,



- исправл. – Москва: Машиностроение, 2003. – Т. 5. – 944 с. – Текст: непосредственный.
133. Степаненко, И. С. Исследование процесса заполнения пресс-формы при инжекционном литье лопаток из композитных материалов / И. С. Степаненко, И. Н. Хаймович // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 7, Ч. 2. – С. 293-297. – Текст: непосредственный.
134. Степанов, А. Высокоскоростное фрезерование в современном производстве / А. Степанов // *CAD/CAM/CAE observer*. – 2002. – № 3. – Текст: непосредственный.
135. Степанова, Т. Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: учебное пособие / Т. Ю. Степанова; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2009. – 64 с. – ISBN 5-9616-0315-4. – Текст: непосредственный.
136. Суслов, А. Г. Научные основы технологии машиностроения / А. Г. Суслов, А. М. Дальский. – Москва: Машиностроение, 2002. – 684 с. – Текст: непосредственный.
137. Технологические методы повышения надёжности деталей ГТД / Д. Г. Федорченко, Д. К. Новиков // *Вестник УГАТУ*. – 2015. – Т. 19, № 1. – С. 62–66. – Текст: непосредственный.
138. Тику, Ш. Эффективная работа: SolidWorks 2004 / Ш. Тику. – Санкт-Петербург: Питер, 2005. – 768 с. – Текст: непосредственный.
139. Тополянский, П. А. Многократное повышение стойкости вырубных штампов / П. А. Тополянский, С. А. Ермаков // *Инструмент и технологическая оснастка: методы повышения эффективности: материалы научно-технического семинара, 26–28 марта 2002 г.* – Санкт-Петербург, 2002. – С. 24-28. – Текст: непосредственный.
140. Точность и надёжность станков с числовым программным управлением / под редакцией А. С. Прогикова. – Москва: Машиностроение, 1982. – 256 с. – Текст: непосредственный.

141. Триандафилов А. Ф. Гидравлика и гидравлические машины: учебное пособие / А. Ф. Триандафилов, С. Г. Ефимова; Сыктывкарский Лесной институт. – Сыктывкар: СЛИ, 2012. – 212 с. – Текст: непосредственный.
142. Уманский, В. Б. Упрочнение деталей металлургического оборудования / В. Б. Уманский, А. А. Костенко, Ю.Т. Худик. – Москва: Металлургия. – 1991. – 176 с. – Текст: непосредственный.
143. Упрочнение стальных поверхностей электрической дугой / А. Е. Михеев, А. В. Гирн, С. С. Ивсаев, В.В. Стацура // Физика и химия обработки материалов. – 2003. – № 8. – С. 88–90. – Текст: непосредственный.
144. Фадеев, М. А. Элементарная обработка результатов эксперимента: учебное пособие / М. А. Фадеев. – Нижний Новгород: ННГУ, 2010. – 122 с. – Текст: непосредственный.
145. Фокина, О. М. Экономика организации [предприятия]: учебное пособие / О. М. Фокина, А. В. Соломка. – Москва: КНОРУС, 2010. – 240 с. – Текст: непосредственный.
146. Фотеев, Н. К. Технология электроэрозионной обработки / Н. К. Фотеев. – Москва: Машиностроение, 1980. – 94 с. – Текст: непосредственный.
147. Фотеев, Н. К. Технология электроэрозионной обработки / Н. К. Фотеев. – Москва: Машиностроение, 1980. – 184 с. – Текст: непосредственный.
148. Хронусов, В. С. Влияние электроискровой упрочняющей обработки на износ разделительных штампов / В. С. Хронусов, Л. Д. Сидоренко // Вестник машиностроения. – 1987. – № 2. – С. 53–55. – Текст: непосредственный.
149. Чейлях, А. П. Перспективные упрочняющие технологии обработки материалов: учебное пособие / А. П. Чейлях, Я. А. Чейлях, Ю. С. Самотугина. – Мариуполь : ООО «ППНС», 2016. – 378 с. – Текст: непосредственный.
150. Чернятин, А. С. Повышение долговечности элементов конструкций посредством глубокого пластического деформирования / А. С. Чернятин, А. А. Ширшов // Известия высших учебных заведений. – 2013. – № 2. – С. 36–41. – Текст: непосредственный.

151. Экономика и управление на предприятии / А. П. Агарков, Р. С. Голов, В. Ю. Теплышев [и др.]. – Москва: Дашков и Ко, 2013. – 400 с. – Текст: непосредственный.
152. Экономика, организация и управление на предприятии : учебное пособие / А. В. Тычинский [и др.]. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2010. – 475 с. – Текст: непосредственный.
153. Эффективность комплексной технологии изготовления деталей сложной геометрии на современных многоцелевых станках / В. А. Тимирязев, М. З. Хостикоев, С. В. Дудко [и др.] // Технология машиностроения. – 2014. – № 10. – Текст: непосредственный.
154. Яшкова, С. С. Лазерное поверхностное упрочнение / С. С. Яшкова. – Текст: электронный // Молодой ученый. – 2017. – № 1. – С. 99–101. — URL <https://moluch.ru/archive/135/37955/> (дата обращения: 11.06.2019).
155. Alauddin, M. Computer-aided analysis of a surface roughness model for end milling / M. Alauddin, M. A. El-Baradie, M. S. J. Hashmi // Journal of Materials Processing Technology. – 1995. – № 55. – P. 123–127. – Текст: непосредственный.
156. Alauddin, M. Optimization of surface finish in end milling inconel 718 / M. Alauddin, M. A. El-Baradie, M. S. J. Hashmi // Journal of Materials Processing Technology. – 1996. – №56. – P. 54–65. – Текст: непосредственный.
157. Baek, D. K. Optimization of feedrate in a face milling operation using a surface roughness model / D. K. Baek, T. J. Ko, H. S. Kim // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2001. – № 41. – P. 451–462. – Текст: непосредственный.
158. Baptista, R. Three and five axis milling of sculptured surfaces / R. Baptista, J. F. Antune Simoes // Journal of Materials Processing Technology. – 2000. – № 103. – P. 398–403. – Текст: непосредственный.
159. Benardos, P. G. Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi's design of experiments / P. G. Benardos, G. C. Vosniakos // Robotics and Computer Integrated Manufacturing. – 2002. – № 18. – P. 343–354. – Текст: непосредственный.

160. Cutting Strategies for Casting Die Manufacturing on CNC Milling Machine / S. Rammohan Reddy, R. Rama Krishna Reddy // *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. – 2013. – Vol. 7, № 4. – P. 15–23. – Текст: непосредственный.
161. Evolutionary programming of CNC machines / M. Kovacic, M. Brezocnik, I. Pahole, J. Balic, B. Kecelj // *Journal of Mechanical Processing Technology*. – 2005. – P. 1379–1387. – Текст: непосредственный.
162. Influence of the Milling Strategy on the Durability of Forging Tools / Ivo Pahole, Karl Gotlih, Dejan Studencnik, Joze Balic, Mirko Ficko // *Journal of Mechanical Engineering*. – 2011. – Vol. 57, № 12. – P. 898–903. – Текст: непосредственный.
163. Influence of workpiece inclination angle on the surface roughness in ball end milling of the titanium alloy Ti-6Al-4V / A. Daymi, M. Boujelbene, M. Linares [et al.] // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – Vol. 35, № 1. – 2009. – P. 79–86. – Текст: непосредственный.
164. Injection molding simulation of plastic impeller and process parameters optimization / Y. Wang [et al.] // *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*. – 2013. – Vol. 31, № 9. – P. 747–751. – Текст: непосредственный.
165. Jun, Qua. Analytical Surface Roughness Parameters of a Theoretical Profile Consisting of Elliptical Arcs / Qua Jun, Albert J. Shihb // *Machining Science and Technology*. – 2003. – № 7 (2). – P. 281–294. – Текст: непосредственный.
166. Kozhevnikov, S. I. Mill Conditions Effect on Roughness of Injection Molds Forming Surfaces / S. I. Kozhevnikov, V. F. Makarov // *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*. Vol. II / Ed.: A. A. Radionov, O. A. Kravchenko, V. I. Guzeev, Yu. V. Rozhdestvenskiy. – [S. l.] : Springer Intern. Publ., 2020. – P. 325–335. – (Lecture Notes in Mechanical Engineering, ISSN 2195-4356).
167. Lou, S. J. In-process surface recognition of a CNC milling machine using the fuzzy nets method / S. J. Lou, J. C. Chen // *Computers in Industrial Engineering*. – 1997. – № 33. – P. 401–404. – Текст: непосредственный.

168. Matsumura, T. An evaluation approach of machine tool characteristics with adaptive prediction / T. Matsumura, H. Sekiguchi, E. Usui // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1996. – № 62. – P. 440 – 447. – Текст: непосредственный.
169. Min, B. H. A study on quality monitoring of injection-molded parts / B. H. Min // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2003. – Vol. 136, № 1-3. – P. 1–6. – Текст: непосредственный.
170. NX для конструктора-машиностроителя / С. Б. Коршиков, П. С. Гончаров, М. Ю. Ельцов [и др.]. – Москва: ДМК Пресс, 2010. – 504 с. – Текст: непосредственный.
171. Optimization of cutting strategies for forging die manufacturing on cnc milling machine / Shantaveerayya B Hiremath, B. Ramreddy // *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*. – 2014. – Vol. 3, № 7. – P. 237-242. – Текст: непосредственный.
172. SANDVIK COROMANT 2010: Руководство по металлообработке. – 2010. – 800 с. – Текст: непосредственный.
173. Simulation of the surface roughness and profile in high speed end milling / K. Y. Lee, M. C. Kang, Y. H. Jeong [et al.] // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2001. – № 113. – P. 410–415. – Текст: непосредственный.
174. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов [и др.]. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с. – Текст: непосредственный.
175. Yin, Y. F. Modeling and Analysis of Process Parameters for Plastic Injection Molding of Base-Cover / Y. F. Yin // *Advanced Materials Research*. – 2012. – Vol. 602-604. – P. 1930–1933. – Текст: непосредственный.

## Фрагменты управляющей программы для фрезерования

## пуансона пресс-формы для детали «Накладка»

%	...N18328 X-261.152 Z8.238	...N35038 Y-31.796 Z-27.54
N1 G40 G17 G90	N18329 X-261.576 Z7.936	N35039 X-279.876 Y-17.391
( OPERATION	N18330 X-262. Z7.631	Z-27.537
:CONTOUR_AREA)	N18331 X-262.424 Z7.318	N35040 X-279.877 Y-17.271
N2 G91 G28 Z0.0	N18332 X-262.848 Z6.996	Z-27.536
N3 T01 M06	N18333 X-263.272 Z6.663	N35041 X-279.875 Y-17.025
N4 G90	N18334 X-263.695 Z6.324	Z-27.541
N5 G54	N18335 X-264.119 Z5.978	N35042 X-279.871 Y-16.555
N6 M08	N18336 X-264.543 Z5.62	Z-27.515
N7 G43 H01 G00 X-282.898	N18337 X-264.967 Z5.25	N35043 X-279.868 Y-16.095
Y31.789 S8000 M03	N18338 X-265.391 Z4.873	Z-27.415
N8 Z66.08	N18339 X-265.815 Z4.491	N35044 X-279.865 Y-15.656
N9 Z-30.602	N18340 X-266.239 Z4.095	Z-27.245
N10 G01 X-282.121 Z-30.505	N18341 X-266.663 Z3.684	N35045 X-279.862 Y-15.249
F280.	N18342 X-267.087 Z3.27	Z-27.009
N11 X-281.395 Z-30.21	N18343 X-267.511 Z2.836	N35046 X-279.859 Y-14.884
N12 X-280.771 Z-29.738	N18344 X-267.935 Z2.396	Z-26.712
N13 X-280.29 Z-29.12	N18345 X-268.359 Z1.942	N35047 X-279.857 Y-14.57 Z-
N14 X-279.985 Z-28.398	N18346 X-268.783 Z1.468	26.361
N15 X-279.878 Z-27.623	N18347 X-269.207 Z.991	N35048 X-279.855 Y-14.315
N16 X-279.874 Z-27.045	N18348 X-269.631 Z.495	Z-25.965
N17 X-279.858 Z-26.455	N18349 X-270.055 Z-.019	N35049 X-279.854 Y-14.124
N18 X-279.844 Z-25.964	N18350 X-270.479 Z-.549	Z-25.535
N19 X-279.832 Z-25.658	N18351 X-270.903 Z-1.092	N35050 X-279.853 Y-14.004
N20 X-279.818 Z-25.405	N18352 X-271.327 Z-1.657	Z-25.08
N21 X-279.805 Z-25.192	N18353 X-271.75 Z-2.245	N35051 X-279.852 Y-13.956
N22 X-279.699 Z-23.687	N18354 X-272.174 Z-2.848	Z-24.611
N23 X-279.594 Z-22.674	N18355 X-272.598 Z-3.474	N35052 Z-13.12
N24 X-279.488 Z-21.802	N18356 X-273.022 Z-4.124	N35053 G00 Z66.08
N25 X-279.382 Z-21.067	N18357 X-273.446 Z-4.809	N35054 M09
N26 X-279.17 Z-19.798...	N18358 X-273.87 Z-5.512	N35055 M30
	N18359 X-274.294 Z-6.252....	%

G40 G17 G90 – Выбор рабочей плоскости XY и задание абсолютных координат;

G91 G28 – Задание координат относительно последней введённой опорной точки и возврат на референтную точку;

T01 M06 – Выбор инструмента и его замена;

G54 – Переключение на заданную управляющей программой систему координат;

M08 – Включение охлаждения;

G43 H01 G00 S8000 M03 – Компенсация длины инструмента, ускоренное перемещение инструмента в начальную точку управляющей программы.

Назначение скорости вращения шпинделя и включение вращения;

N – Номер строки управляющей программы;

M09 M30 – Выключение охлаждения и конец программы.



# ООО «Промышленная компания «ДЭМИ»

Утверждаю:  
 Директор ООО «ПК Дэми»  
 Родычкин К.В.  
 2019г.



## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

метода


Аспирантом кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ПНИПУ Кожевниковым С.И. под руководством д.т.н., проф. кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ПНИПУ Макарова В.Ф., в ходе технического сотрудничества внедрен метод обработки формообразующих поверхностей пресс-форм путем направленного формирования микрорельефа при обработке на станках с ЧПУ, обеспечивающий повышение долговечности пресс-форм, увеличение производительности технологического цикла литья и качества деталей из полимерных композиционных материалов.

Руководящие материалы используются для составления управляющих программ обработки пресс-форм.

Технико-экономические показатели внедрения

1. Повышение долговечности произведенных пресс-форм на 35-40%.
2. Увеличение производительности процесса литья на 20-22%.
3. Снижение себестоимости конечного изделия до 15%.

Подписи:

 аспирант Кожевников С.И.

 заместитель директора ООО «ПК Дэми» Краснянский С.Ю.





УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора по науке и инновациям  
ФГАОУ ВО «Пермский национальный  
исследовательский политехнический  
университет»,  
д-р техн. профессор

В.Н. Коротаев

« 5 » апреля 2022 г.

## АКТ

внедрения результатов диссертационной работы  
в образовательный процесс

В ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» внедрены в образовательный процесс результаты диссертационной работы Кожевникова Сергея Игоревича «Технологическое обеспечение и повышение долговечности литейных пресс-форм на основе программируемого формирования рационального микрорельефа формообразующих поверхностей при фрезеровании на станках с ЧПУ» на кафедре «Инновационные технологии машиностроения» в учебных дисциплинах «Технология машиностроения» и «Резание материалов».

д-р техн. наук, профессор  
заведующий кафедрой «Инновационные  
технологии машиностроения»

В.В. Карманов