

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель: **Макаров Владимир Федорович,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Гузеев Виктор Иванович,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет»,
кафедра «Технологии автоматизированного машиностроения», профессор

Кугультинов Сергей Данилович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»,
кафедра «Технология производства систем вооружения», профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет», г. Брянск

Защита диссертации состоится «27» января 2023 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д ПНИПУ.05.18 в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, д.29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.pstu.ru федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Автореферат разослан _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д ПНИПУ.05.18
доктор технических наук, профессор

М.Ш. Нихамкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современном машиностроении одним из самых перспективных в мировой практике и экономичных способов крупносерийного и массового производства деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ) является литье под давлением в пресс-формы, изготовленные из закаленных сталей. Применение этого способа позволяет получать геометрически сложные изделия высокой точности и качества. Однако широкое применение этой высокоэффективной технологии изготовления деталей из ПКМ сдерживается из-за проблем повышенного изнашивания формообразующих поверхностей пресс-форм твердыми частицами стекло- или углеволокна, входящими в состав расплава ПКМ и движущихся в момент заполнения пресс-формы под высоким давлением.

В результате проведенного анализа литературных источников, производственного опыта предприятий и предварительных исследований данной проблемы установлено, что при фрезерной окончательной обработке формообразующих поверхностей в различных полостях сложной пространственной пресс-формы остаются следы обработки в виде макрорельефа различной высоты и различного направления. Высказано предположение, что полученный при фрезеровании макрорельеф поверхности и его направление в каждой полости пространственной пресс-формы препятствует равномерной скорости заполнения всех полостей пресс-формы и способствует быстрому износу некоторых высокоточных профильных поверхностей пресс-форм.

Ремонт или замена изношенных пресс-форм и формообразующих деталей является дорогим и трудоемким процессом. Стоимость одной пресс-формы для изготовления деталей из ПКМ может составлять несколько десятков миллионов рублей в зависимости от размеров и сложности профиля, а затраты времени при изготовлении формообразующих поверхностей пресс-форм занимают до 95 % общего времени обработки. Производство таких сложных деталей пресс-форм связано с использованием дорогостоящего оборудования и инструмента, а технологический процесс сложен и растянут во времени, что значительно увеличивает себестоимость конечного изделия.

Анализ литературы и производственного опыта показал, что при различных применяемых на практике методах повышения износостойкости пресс-форм не установлено влияние высоты и направления макрорельефа на формообразующих поверхностях в различных полостях пресс-форм на износ и время заполнения пресс-форм.

Таким образом, решение проблемы повышения износостойкости пресс-форм, позволяющее снизить себестоимость путем увеличения ресурса оснастки и снижения времени производственного цикла, является актуальной задачей 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; V. 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 наименьшее 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность представленной научной и производственной проблематики в диссертационной работе, сформулирована цель и задачи работы, представлены научная новизна и практическая значимость.

В первой главе проведен анализ литературы и производственного опыта применения методов повышения износостойкости деталей, в том числе и формообразующих поверхностей пресс-форм. Приведены конструкторско-технологические требования к изготовлению пресс-форм, формообразующих деталей и поверхностей из закаленных сталей 40X13 и 38ХНМ твердостью 55–60 НРС. К сложным формообразующим деталям пресс-форм предъявляются высокие технические требования по точности (6–8-й квалитеты) и шероховатости ($Ra \leq 0,4$ мкм), таким образом, изготовление таких деталей сопряжено с высокой трудоемкостью и дороговизной. Затраты на изготовление одной сложной многополостной пространственной пресс-формы сегодня могут достигать десятков миллионов рублей.

Широкое применение высокоэффективной технологии изготовления деталей из полимерных композиционных материалов сдерживается из-за проблем повышенного абразивного изнашивания формообразующих поверхностей пресс-форм твердыми частицами стекло- или углеволокна, входящими для повышения прочности в состав расплава полимерного композиционного материала и движущихся в момент заполнения пресс-формы под высоким давлением. Ремонт или замена изношенных пресс-форм, в

частности, формообразующих деталей, является дорогостоящим и трудоемким процессом.

Проведен анализ проблем, возникающих при изготовлении и эксплуатации пресс-форм, а также рассмотрена техническая литература по решению проблем повышения качества, надежности и износостойкости формообразующей оснастки. Рассмотрены результаты работ по вопросам управления траекторией фрезерования с целью повышения точности и качества обработки формообразующих пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ.

Теоретическими основами поиска эффективных методов управления фрезерованием на станках с ЧПУ для повышения качества формообразующих поверхностей занимались А.А. Маталин, Б.С. Балакшин, В.С. Мендельсон, Л.И. Рудман, Ф.П. Михаленко, М.М. Палей и др.

Проанализированы пути повышения износостойкости при обработке деталей пресс-форм со сложной криволинейной формообразующей поверхностью. Вопросами повышения износостойкости формообразующих поверхностей занимались в таких научных школах, как МГТУ им Н. Э. Баумана, УГАТУ, СПбГТИ, ОГУ, ВИАМ, БГТУ, ИГХТУ, СибГУ им. М.Ф. Решетнева, ПНИПУ и другие.

Анализ работ отечественных и зарубежных учёных показал, что вопросами обеспечения качества обработанной поверхности, износостойкости деталей после различных видов механической обработки резанием занимались А.Г. Суслов, В.А. Кривоухов, В.А. Прилуцкий, В.И. Гузеев, В.Ф. Безъязычный, В.Ф. Макаров, М.М. Аршанский, П.Р. Родин, П.Л. Чебышев, С.Н. Корчак и др.

Проведен анализ работ по исследованию движения вязкотекучих материалов в закрытых формах. Такие работы сегодня достаточно новы, так как сопряжены с САЕ-моделированием и требуют новейшего программного обеспечения. В таких работах преимущественно исследуются режимы, обеспечивающие равномерное заполнение и необходимую ориентацию волокон композиционных материалов для повышения физико-механических свойств деталей, однако рассмотренные процессы не учитывают направление макронеровностей и шероховатости формообразующих поверхностей пресс-форм и их влияние на время заполнения и абразивный износ поверхностей под действием твердых частиц стекло- или углеволокна.

В работах отечественных и зарубежных ученых приведены результаты по обеспечению качества формообразующих поверхностей, упрочнению, нанесению покрытий и химико-термической обработке формообразующих деталей различными методами, которые в полной мере не обеспечивают достижения требуемой износостойкости и производительности технологического цикла.

Во многих случаях при повышении износостойкости выявлено использование специального дополнительного оборудования и инструментов, а соответственно, и значительное повышение затрат и себестоимости конечного изделия. Необходимо найти такой способ повышения, который не требовал бы дополнительных затрат при изготовлении пресс-форм, с возможностью использования такого способа на существующем оборудовании в технологическом процессе.

Анализ работ отечественных и зарубежных авторов по увеличению износостойкости деталей сложной геометрической формы показал, что практически отсутствуют теоретические и практические исследования по влиянию высоты и направления макрорельефа на формообразующих поверхностях на износостойкость пресс-форм.

Во второй главе проведено моделирование процесса формообразования макрорельефа на формообразующих поверхностях пресс-форм, рассмотрена и обоснована взаимосвязь направления макрорельефа и времени заполнения полостей пресс-формы.

Выдвинута гипотеза, что при использовании технологии направленного формообразования макрорельефа на формообразующих поверхностях при фрезеровании на станках с ЧПУ обеспечивается минимальное время заполнения всех полостей пресс-формы, что характеризует меньший абразивный износ твердыми частицами композита.

Установлено, что для снижения износа поверхностей необходимо обеспечить при фрезеровании рациональный по направлению макрорельеф.

При чистовом фрезеровании криволинейных закаленных формообразующих поверхностей используют концевые твердосплавные сферические фрезы. Путем назначения величины расстояния между строк при программировании движения фрезы формируется макрорельеф с остаточным сечением среза определенной высоты.

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 рисунке 1, при этом существует возможность производить обработку под любым углом по отношению к обрабатываемой поверхности.

При фрезеровании сложных криволинейных формообразующих поверхностей концевыми сферическими фрезами между двумя соседними проходами возникает макрорельеф в виде остаточного сечения среза при поперечной подаче, который зависит от радиуса кривизны обрабатываемой поверхности, радиуса инструмента и шага между проходами фрезерования P_n и P_{n+1} (рисунок 2). Высота макрорельефа R рассчитывается по формуле:

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

где $R_{\text{фр}}$ – радиус фрезы;

ΔS – расстояние между строками;

ρ – радиус кривизны обрабатываемой поверхности.

Таким образом, расчетная высота макрорельефа определяется геометрией поверхности и кинематикой перемещения инструмента. Однако она будет несколько отличаться при фрезеровании из-за наличия пластических деформаций в зоне контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью и колебаний инструмента относительно обрабатываемой поверхности.

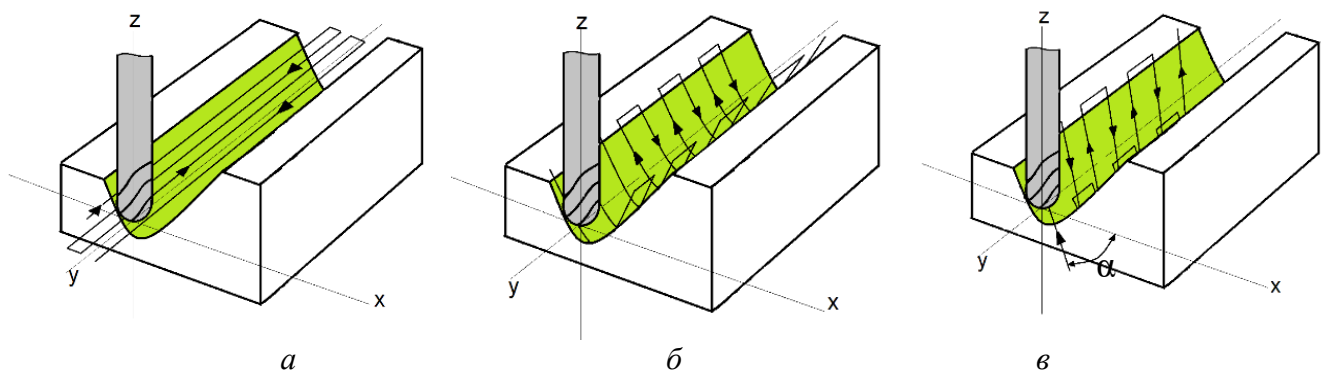


Рисунок 1 – Схема обработки формообразующей поверхности с движением фрезы параллельно к профилю поверхности (а), по нормали к профилю поверхности (б), под углом α (в)

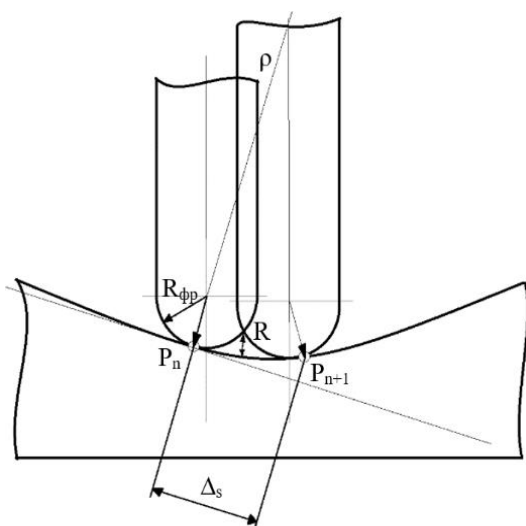


Рисунок 2 – Схема формирования макрорельефа при фрезеровании формообразующей поверхности

В теории гидравлики известно, что любые поверхности полостей, по которым течет жидкость, имеют определенные неровности. Возникающие потери энергии при движении расплава зависят от шероховатости и от направления макрорельефа, определение величины этих потерь является одним из основополагающих вопросов. Частицы жидкости, двигаясь в массе, теряют энергию тем интенсивнее, чем выше неровности, 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. Направление макрорельефа задает вектор течения расплава, а шероховатость влияет на интенсивность движения по обработанной поверхности.

Исходя из анализа и классификации конструктивных особенностей типовых представителей сложных пространственных пресс-форм, проведены упрощения конструкций участков поверхностей пресс-форм до простейших полостей (рисунок 3). Пример корпусной многополостной пространственной пресс-формы до упрощения участков представлен на рисунке 3, а. Для упрощения теоретического анализа и моделирования процесса движения расплава рассмотрены несколько типов полостей формообразующих поверхностей пресс-форм (рисунок 3, б).

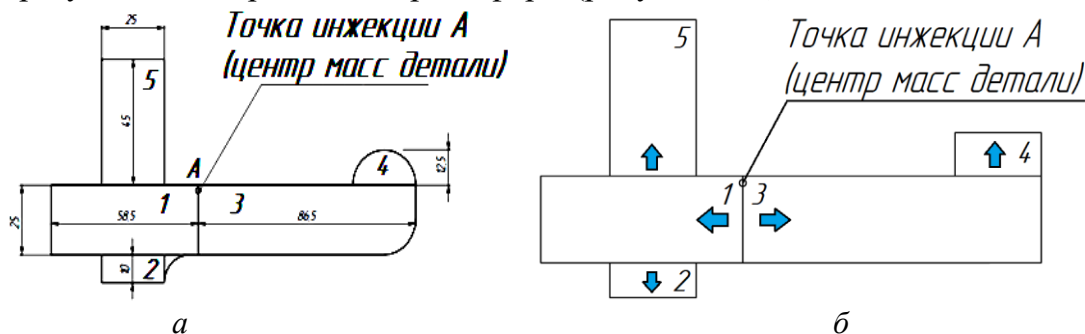


Рисунок 3 – Схема формообразующих поверхностей типовой многополостной пространственной пресс-формы (а), схема разбиения пресс-формы на полости для моделирования процесса движения расплава (б)

Для моделирования процесса движения расплава в SolidWorks Plastics, движущегося по поверхности, заданы следующие физико-механические свойства полимерного композиционного материала ПА66КС: температура плавления 280–290 °С, вязкость 300 Па·с, плотность 1,36 г/см³, а также на поверхности полостей смоделирована макрогеометрия рельефа с высотой R , полученного расчетом при фрезеровании с поперечной подачей $\Delta S=0,1$ мм и диаметром фрезы $D=6$ мм. Давление, температуру и прочие физико-реологические характеристики система САПР рассчитывает автоматически в зависимости от заданных параметров.

Для каждой полости проведено математическое моделирование процесса заполнения пресс-формы с использованием программного комплекса SolidWorks. Результаты моделирования движения расплава для полости размерами 25x25 мм представлены на рисунке 4 в виде визуализации направлений течения расплава при одном и том же давлении для различных направлений траектории фрезерования этой полости. В

САЕ-системе SolidWorks определяется множество векторов ($\vec{V}_1, \vec{V}_2 \dots \vec{V}_n$), сумма которых будет называться главным вектором (\vec{R}) течения расплава (рисунок 4а). Установлено, что главный вектор течения расплава коллинеарен вектору движения расплава в точке инъекции, без учета рельефа поверхности. Влияние рельефа формообразующих поверхностей обусловлено следующей схемой взаимодействия расплава и формообразующей поверхности (рисунок 4б). Расплав встречает препятствие – сопротивление при движении по формообразующей поверхности в виде гребешков – следов фрезерования, поэтому выполнено моделирование процесса заполнения пресс-формы с рельефом формообразующих поверхностей с различными углами направления макрорельефа относительно главного вектора расплава и рассчитаны технологические параметры литья с применением программы CAD/CAM/CAE-системы SolidWorks, T_3 – время, за которое полость заполняется полимерным материалом, T_0 – время, за которое согласно технологическому процессу полость с полимерным материалом охлаждается, $T_{\text{общ}}$ – общее время технологического цикла, сумма времени заполнения и времени охлаждения.

В результате анализа полученных данных и выполненных расчетов установлено, что наиболее рациональным является такой угол направления рельефа α по отношению к главному вектору движения расплава \vec{R} , при котором время полного цикла заполнения и остывания пресс-формы $T_{\text{общ}}$ будет наименьшим.

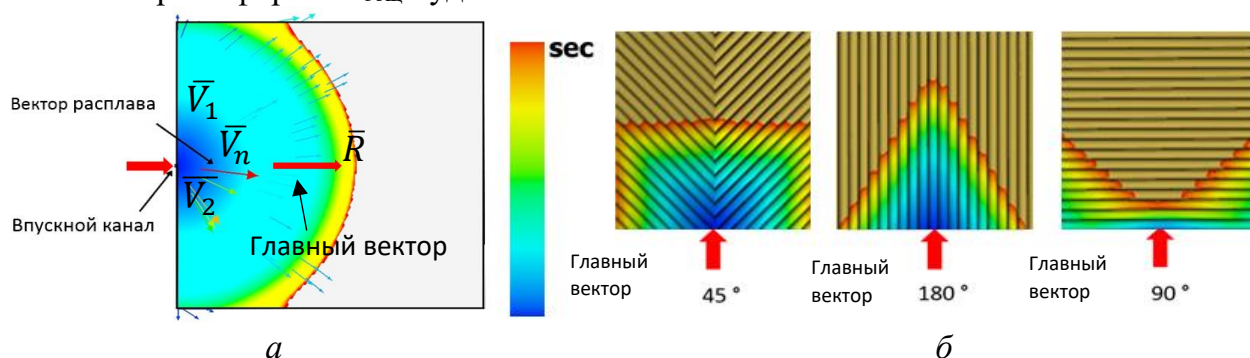


Рисунок 4 – Визуализация моделирования процесса течения расплава при определении главного вектора (а) и визуализация результатов расчета времени заполнения пресс-формы T_3 с учетом параметров рельефа поверхности при фрезеровании (б)

Таким образом установлено, что рациональная траектория обработки фрезой такая, при которой сформированный макрорельеф при фрезеровании способствует более быстрому и равномерному движению расплава по формообразующей поверхности. В результате износ пресс-формы происходит более равномерно и характеризуется меньшей величиной, при этом сокращается время заполнения, повышается производительность технологического цикла, а также снижается себестоимость получаемых деталей. Таким образом, на основе моделирования впервые установлена взаимосвязь времени заполнения пресс-формы от направления макрорельефа формообразующих поверхностей, полученных при фрезеровании, которое, в свою очередь, зависит от размеров и конфигурации рассматриваемых полостей. Аналогичное исследование проведено и для полостей других размеров. Согласно теории подобия и анализа размерностей, используемых в расчетах SolidWorks, определены коэффициенты подобия k_i для полостей различных размеров и различного направления течения расплава, для каждой из них выбран и рекомендован рациональный по направлению макрорельеф на поверхности (рисунок 5).

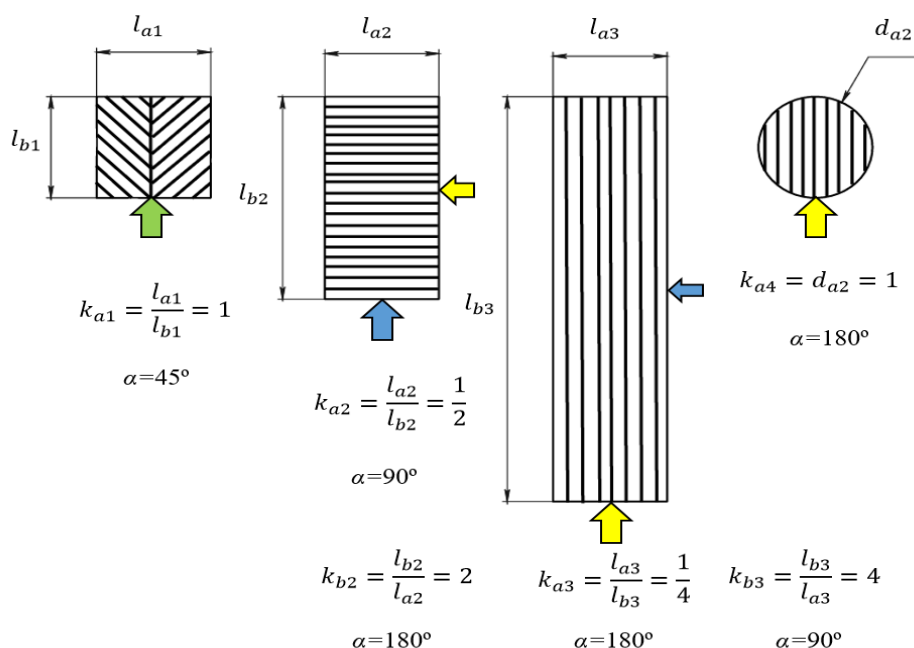


Рисунок 5 – Рекомендации по выбору траектории фрезерования для различных полостей пресс-формы

Рациональным углом α для простейших прямоугольных полостей с коэффициентом подобия $k \leq 0,25$ и $2 \leq k < 4$ будет являться угол $\alpha = 180^\circ$, для полостей 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 полостей различного диаметра рациональный угол $\alpha = 180^\circ$. Установлено, что использование выявленных в результате моделирования взаимосвязей рационального макрорельефа формообразующих поверхностей с параметрами технологического цикла литья позволяет достичь минимального времени заполнения пресс-форм. Однако результаты моделирования необходимо проверить и подтвердить путем экспериментальных исследований.

В третьей главе представлена разработанная методика экспериментальных исследований по установлению достоверности ранее проведенных теоретических исследований при моделировании процесса заполнения полостей и определению высоты и направления рационального макрорельефа на формообразующих поверхностях при фрезеровании различных полостей пресс-форм. Проведен выбор исследуемых материалов и образцов, режущего инструмента и проанализированы их геометрические характеристики, используемое оборудование. Представлены методики проведения измерений шероховатости, износа и производительности цикла литья.

Для исследований рассмотрены чертежи 38 типовых сложных деталей из полимерных композиционных материалов, спроектированы и изготовлены 38 пресс-форм. Также подготовлены образцы для проведения полного факторного эксперимента по установлению функциональной связи шероховатости обрабатываемой поверхности в зависимости от назначаемых режимов фрезерования, а также функциональной связи величины макрорельефа от параметров поверхности и параметров фрезерования. Материалом пресс-форм и образцов приняты наиболее часто используемые при производстве формообразующих деталей пресс-форм закаленные стали 38ХНМ и 40Х13 с твердостью после термообработки 55-57HRC. Экспериментальные исследования проводились в производственных условиях машиностроительного предприятия, где для изготовления пресс-форм использовался обрабатывающий центр модели HAAS VM-6, а для проведения полного факторного эксперимента выбран вертикально-фрезерный обрабатывающий центр Haas VF-3. В качестве инструмента выбраны твердосплавные

концевые фрезы ISCAR SolidMill с углом подъема спирали 30° для обработки закаленных сталей твердостью до 65 HRC, обеспечивающие при обработке геометрические параметры формообразующих поверхностей. Обрабатывались образцы длиной 100 мм, что соответствует длине формообразующих поверхностей пресс-форм, время заполнения измерялось на термопластавтоматах. Каждый опыт повторялся три раза.

Измерения шероховатости проводились с помощью профилометра TR210, для измерения износа применялся цифровой микроскоп SMARTZOOM, а производительность цикла литья замерялась на термопластавтоматах CUN в зависимости от габаритных размеров пресс-форм.

Для определения функциональных зависимостей величины шероховатости от режимов фрезерования, величины макрорельефа от параметров поверхности и параметров фрезерования, величины времени заполнения полостей от параметров поверхности использован полный факторный эксперимент. В качестве независимых переменных для зависимости высоты макрорельефа приняты: кривизна поверхности – ρ , величина строчки – ΔS и радиус фрезы – $R_{\text{фр}}$. Для зависимости величины шероховатости от режимов фрезерования приняты: скорость резания – V , подача на оборот – S_0 и глубина резания – t . Для зависимости величины времени заполнения приняты: угол направления макрорельефа – α , величина макрорельефа – R и величина шероховатости – R_a .

Для изготовления 38 пресс-форм разработан алгоритм, по которому для каждой пресс-формы и обрабатываемой поверхности составлялись программы для станка с ЧПУ с учетом траектории фрезерования, выбранной на основе математического моделирования направления главного вектора течения расплава, который в свою очередь определяется CAE-моделированием в программном комплексе SolidWorks в каждой из ячеек, на которые разделена пресс-форма.

В четвертой главе описаны результаты экспериментальных исследований применения на практике ранее проведенных теоретических исследований при моделировании процессов заполнения полостей и определению величины и направления рационального макрорельефа на формообразующих поверхностях при фрезеровании формообразующих поверхностей 38 пресс-форм.

Приведены результаты исследования влияния направления макрорельефа на износостойкость формообразующих поверхностей и производительность технологического цикла. Осуществлен регрессионный анализ по известным методикам. Оценка коэффициентов уравнения регрессии проводилась методом наименьших квадратов, значимость коэффициентов проверялась по критерию Стьюдента. Адекватность математических моделей проверялась по критерию Фишера – модели адекватны. Получена эмпирическая математическая модель полного факторного эксперимента для определения функциональной связи величины макрорельефа от параметров поверхности и параметров фрезерования:

$$R = e^{-1,79} \rho^{-0,16} \Delta S^{1,57} R_{\text{фр}}^{-0,61}, \text{ мм.} \quad (3)$$

При увеличении шага строчки при фрезеровании поверхности величина макрорельефа значительно увеличивается. Параметры $R_{\text{фр}}$ и ρ также влияют на величину макрорельефа: при увеличении $R_{\text{фр}}$ и ρ величина макрорельефа уменьшается.

По данной зависимости выбирался шаг строчки в зависимости от обрабатываемых формообразующих поверхностей пресс-форм, ее кривизны и геометрических параметров.

Получены эмпирические математические модели полного факторного эксперимента для определения функциональной связи шероховатости обрабатываемой

поверхности в зависимости от назначаемых режимов фрезерования на обрабатывающем центре HAAS сталей 40X13 и 38XHM соответственно:

$$Ra = e^{2,8} V^{-0,433} S_0^{0,207} t^{0,674}, \text{ мкм.} \quad (2)$$

$$Ra = e^{2,96} V^{-0,474} S_0^{0,265} t^{0,775}, \text{ мкм.} \quad (3)$$

При увеличении скорости резания V , высота неровностей уменьшается. Параметры S_0 и t меньше влияют на величину шероховатости, при увеличении S_0 и t Ra возрастает.

По данным зависимостям назначены режимы фрезерования для обеспечения требований, предъявляемых к формообразующим поверхностям ($Ra \leq 0,4$ мкм) и назначены режимы фрезерования для фрезы со сферическим концом: $V=150$ м/мин; $S_0=0,3$ мм; $t=0,2$ мм, которые применены для обработки формообразующих деталей пресс-форм.

Для различных коэффициентов подобия получены эмпирические математические модели полного факторного эксперимента для определения функциональной связи величины времени заполнения от параметров поверхности.

Для коэффициента подобия $k \leq 0,25$ при $\alpha=90^\circ-180^\circ$:

$$T_3 = e^{8,02} \alpha^{-0,94} R^{0,42} R_a^{0,22}, \text{ с.} \quad (5)$$

Для коэффициента подобия $0,25 < k \leq 0,5$ при $\alpha=90^\circ-180^\circ$:

$$T_3 = e^{-2,25} \alpha^{1,14} R^{0,55} R_a^{0,31}, \text{ с.} \quad (6)$$

Для коэффициента подобия $0,5 < k < 2$ при $\alpha=45^\circ-90^\circ$:

$$T_3 = e^{-2,52} \alpha^{1,27} R^{0,63} R_a^{0,38}, \text{ с.} \quad (7)$$

Для коэффициента подобия $2 \leq k < 4$ при $\alpha=90^\circ-180^\circ$:

$$T_3 = e^{8,75} \alpha^{-1,15} R^{0,46} R_a^{0,36}, \text{ с.} \quad (8)$$

Для коэффициента подобия $k \geq 4$ при $\alpha=90^\circ-180^\circ$:

$$T_3 = e^{-1,12} \alpha^{1,02} R^{0,51} R_a^{0,27}, \text{ с.} \quad (8)$$

При изменении угла α время заполнения T_3 изменяется по-разному, в зависимости от геометрических параметров полости. При увеличении шероховатости, а также при увеличении величины макрорельефа время заполнения полости увеличивается.

Представленные зависимости иллюстрируют результаты проведенной работы, данные зависимости необходимы для прогнозирования времени заполнения полостей пресс-форм в зависимости от параметров обрабатываемых формообразующих поверхностей.

Для повышения степени точности при изготовлении 38 пресс-форм, объективности и полноты исследуемых данных одна часть пресс-форм изготовлена по серийной технологии, вторая часть пресс-форм – по новой технологии направленного формообразования макрорельефа, а третья имела несколько полостей, где одна или группа полостей обрабатывалась по новой технологии направленного формообразования макрорельефа, а другие обрабатывались по серийной технологии (рисунок 6).

Разработан алгоритм для составления программ для станков с ЧПУ для обработки формообразующих деталей различных пресс-форм. Программы написаны с учетом выбора рациональных углов траектории фрезерования по отношению к главному вектору течения расплава. Проведена обработка формообразующих поверхностей деталей и осуществлены замеры производительности цикла изготовления изделий и износа пресс-форм (таблица). Гистограмма зависимости износа от количества циклов приведена на рисунке 7.

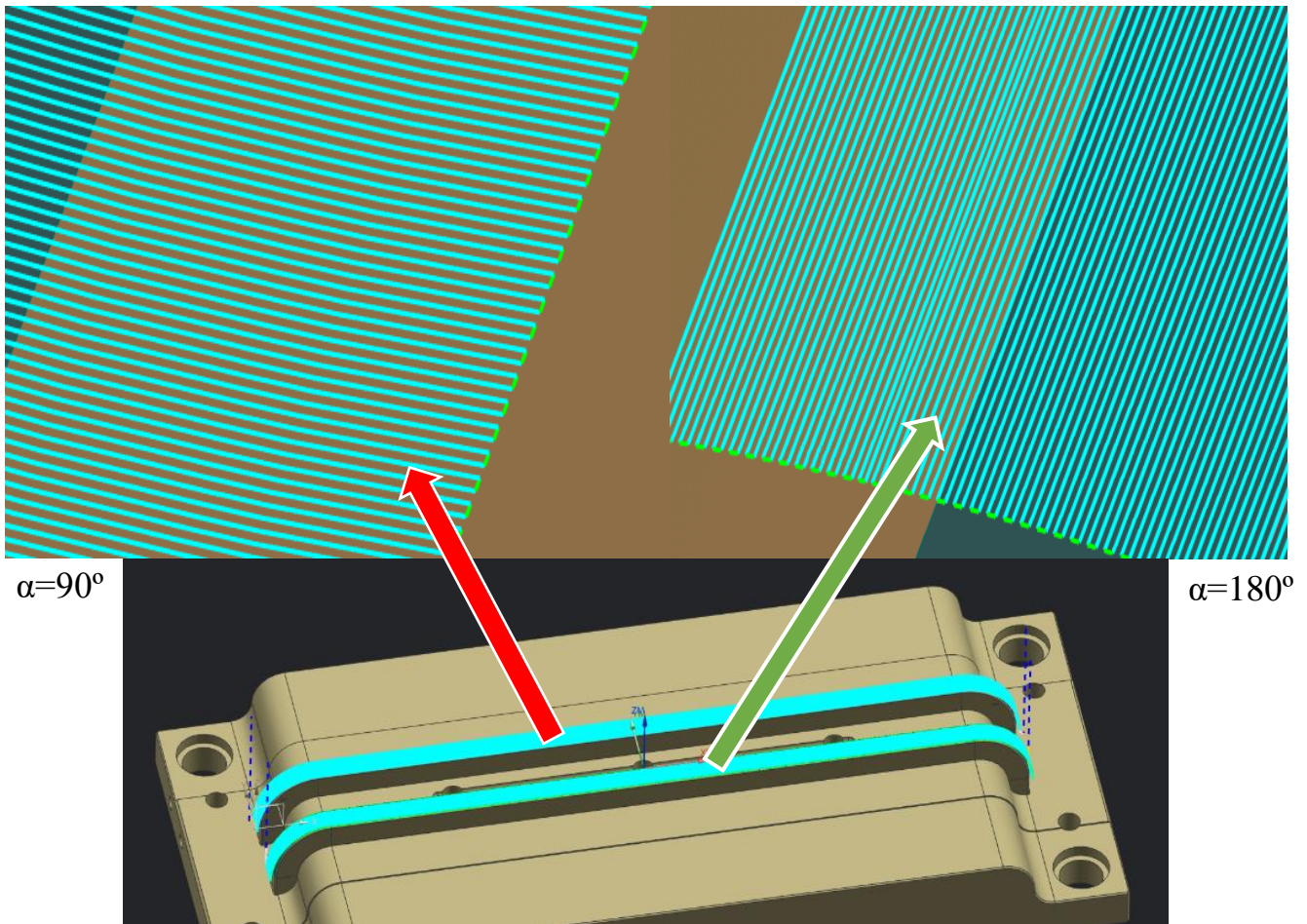


Рисунок 6 – Схема фрезерования двух ячеек пуансона пресс-формы с разными углами направления траектории фрезы $\alpha=90^\circ$ и 180°

Изменение времени технологического цикла и износа в зависимости от метода обработки формообразующих поверхностей пресс-форм

Пресс-форма	№ Гнезда	Метод обработки	Время технологического цикла, с	Повышение произв-сти, %	Средний износ на тыс. циклов, мкм	Снижение износа, %
1800–4103	1–4	ТНФМ	12,3	25	0,05	45
	5–8	Серийная технология	16,5		0,092	
0606–1022	1	ТНФМ	35,8	20	0,058	37
	2	Серийная технология	44,8		0,092	
1800–4064	1–2	ТНФМ	30,8	22	0,066	34
	3–4	Серийная технология	39,5		0,1	
1800–4076	1	ТНФМ	69,1	26	0,041	45
	2	Серийная технология	93,7		0,075	

Кол-во циклов

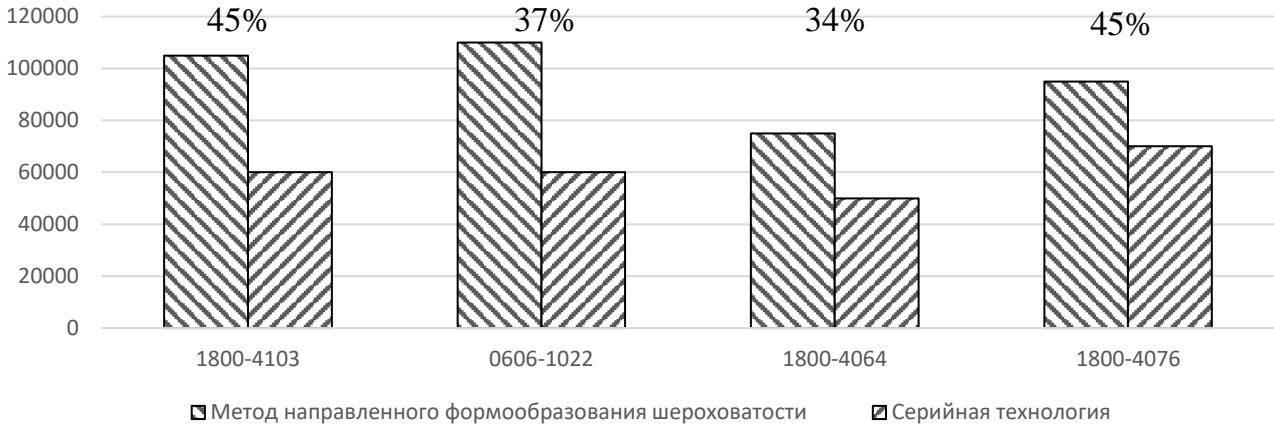


Рисунок 7 – Сравнительная гистограмма количества циклов до достижения износа в зависимости от технологии изготовления пресс-формы

В результате экспериментальных исследований выявлено, что применение технологии направленного формирования макрорельефа позволяет увеличить производительность цикла литья до 25 %, снизить износ формообразующих поверхностей до 45 %. Экспериментально доказано положительное влияние применения технологии направленного формирования макрорельефа при фрезеровании на степень износа формообразующих поверхностей и производительность технологического процесса.

В пятой главе представлены технологические рекомендации и алгоритм разработки программ для станков с ЧПУ для работы цеховых технологов при технологической подготовке производства новых пресс-форм по назначению рациональной траектории фрезерования и установлению рациональных режимов резания для создания рационального макрорельефа на формообразующих поверхностях, обеспечивающего наименьший износ поверхностей и высокую производительность работы пресс-форм (рисунок 8).

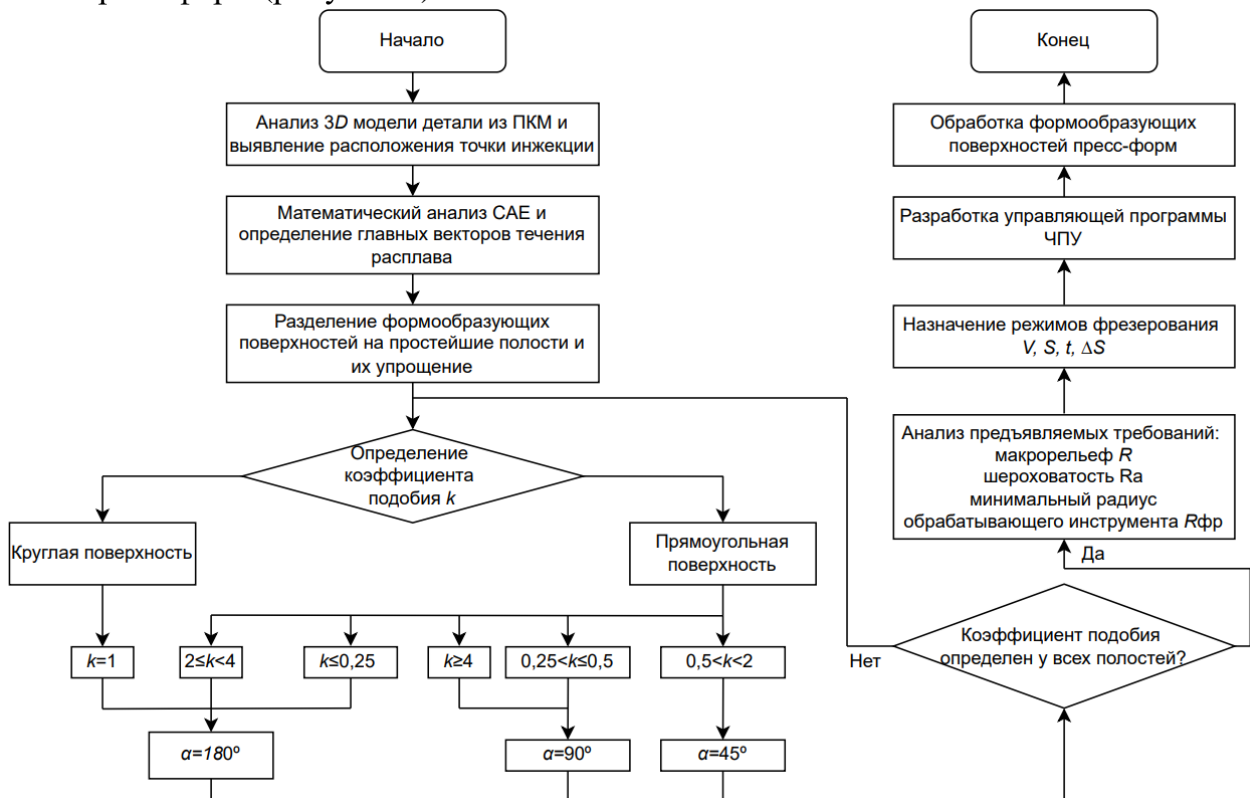


Рисунок 8 – Блок-схема алгоритма разработки программного управления на основе использования компьютерного моделирования для изготовления пресс-форм

Технологические рекомендации переданы для внедрения на предприятия ООО «ПК ДЭМИ» и ООО «Пермский крепеж». Данный алгоритм применяется в производственных условиях, по алгоритму разработаны программы для станков с ЧПУ, производится обработка формообразующих поверхностей пресс-форм. В результате внедрения новой технологии производства пресс-форм снизился износ произведенных деталей пресс-форм на 45 % и увеличилась производительность процесса на 25 %, что позволило снизить себестоимость конечного изделия на 20–30 %. Произведено по новой технологии более 9 млн деталей за 2015–2021 г.г. 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 α 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; $S_0=0,3$ мм/об; $t=0,2$ мм для обеспечения требуемой шероховатости, высота макрорельефа R и шаг поперечной подачи ΔS 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 работ, опубликованных автором по теме диссертации:

Статьи, опубликованные в изданиях ВАК РФ:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

Статьи, опубликованные в изданиях индексируемых в базе Scopus:

4. 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).

Статьи, опубликованные в других изданиях:

5. 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.*

6. 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.*

7. 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.*

8. 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.*

9. 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.*

10. 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): труды Международной научно-технической конференции (Санкт-Петербург, 6-8 окт. 2016 г.) / М-во образования и науки Рос. Федерации, Ком. по науке и высш. шк. Правительства Санкт-Петербурга, Санкт-Петербург. гос. политехн. ун-т им. Петра Великого, Ассоц. технологов-машиностроителей России, С.-Петерб. отд-ние Рос. акад. наук, Междунар. союз машиностроителей, С.-Петерб. торгово-пром. палата. - Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). 7 с. – Загл. с экрана. – Текст: электронный.*

11. Кожевников, С.И. Исследование влияния траектории фрезерования на износ поверхности пресс-форм при литье композиционных материалов / В. Ф. Макаров, С. И. Кожевников // *Машиностроение и техносфера XXI века : сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции (10-16 сент. 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.*

12. 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.

13. 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 XXII Всероссийской научно-технической конференции ; Пермский национальный исследовательский политехнический университет.* – Текст : электронный. – Пермь : ПНИПУ, 2015. – С.101–105.

14. 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.

15. 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.