

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи

Галкина Наталья Викторовна

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТАРИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
КАЧЕСТВА ИНЖЕКЦИОННОГО ЛИТЬЯ ИЗДЕЛИЙ
ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРОВ

2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация.
Организация производства

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Хаймович Александр Исаакович,
доктор технических наук,
доцент

Самара - 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 6 |
| 1 ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ЭТАПЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА. ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ..... | 15 |
| 1.1 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ..... | 15 |
| 1.2 АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ ПРОСТЫХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ДЛЯ ЗАДАЧ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕКЦИОННОГО ЛИТЬЯ | 20 |
| 1.3 АНАЛИЗ НЕСООТВЕТСТВИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ОТЛИВКАХ ПРИ ИНЖЕКЦИОННОМ ЛИТЬЕ..... | 26 |
| 1.4 АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛА САЕ-СИСТЕМ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ЛИТЬЯ НА ЭТАПЕ КТПП | 33 |
| 1.5 МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ИНЖЕКЦИОННОГО ЛИТЬЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САЕ-СИСТЕМ | 43 |
| 1.5.1 МЕТОД ТАГУЧИ..... | 45 |
| 1.5.2 РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ | 47 |
| 1.5.3 МЕТОД КРУТОГО ВОСХОЖДЕНИЯ..... | 48 |
| 1.5.4 ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ ANOVA | 50 |
| 1.6 ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ НА ПРАКТИКЕ | 51 |
| 1.7 МЕТОДЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ..... | 53 |
| 1.7.1 СЕРЫЙ РЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ (GREY RELATIONAL ANALYSIS OF QUALITY INDICATORS) | 54 |
| 1.7.2 ФУНКЦИЯ ЖЕЛАТЕЛЬНОСТИ | 56 |
| 1.8 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1 | 57 |
| 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ОТЛИВОК НА ЭТАПЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ . | 60 |

| | |
|--|-----|
| 2.1 СУЩЕСТВУЮЩАЯ ПРАКТИКА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ | 61 |
| 2.2 АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОКАЗЫВАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ НА КАЧЕСТВО ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВОК ИЗ ПКМ МЕТОДОМ ИНЖЕКЦИОННОГО ЛИТЬЯ..... | 64 |
| 2.3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ | 68 |
| 2.4. ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ 2 | 73 |
| 3 АДАПТАЦИЯ МЕТОДИКИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ОТЛИВОК НА ЭТАПЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРИ ИНЖЕКЦИОННОМ ЛИТЬЕ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ | 74 |
| 3.1 КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИНЖЕКЦИОННОГО ЛИТЬЯ И ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРЕСС-ФОРМЫ | 76 |
| 3.2 РАСЧЕТ КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА ТОНКОСТЕННОЙ ДЕТАЛИ ПРИ КОНФОРМНОЙ СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ..... | 80 |
| 3.3 РАСЧЕТ КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА ТОНКОСТЕННОЙ ДЕТАЛИ ПРИ ТРАДИЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ | 88 |
| 3.4 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ТОНКОСТЕННОГО ИЗДЕЛИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ | 93 |
| 3.5 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3 | 96 |
| 4 АДАПТАЦИЯ МЕТОДИКИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ОТЛИВОК НА ЭТАПЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРИ ИНЖЕКЦИОННОМ ЛИТЬЕ ИЗДЕЛИЙ С ТРЕБОВАНИЯМИ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ | 98 |
| 4.1 СОСТАВЛЕНИЕ ПЛАНА ЭКСПЕРИМЕНТОВ | 107 |
| 4.2 РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИНЖЕКЦИОННОГО ЛИТЬЯ..... | 110 |

| | |
|---|-----|
| 4.3 GREY RELATIONAL АНАЛИЗ | 116 |
| 4.4 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АРМИРОВАННОЙ И НЕАРМИРОВАННОЙ ОТЛИВКИ..... | 119 |
| 4.5 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4 | 120 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 122 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 125 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А «РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТР «ПОЛНОЕ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕЕ СМЕЩЕНИЕ» | 134 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б «РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТР «МАКСИМАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО МИЗЕСУ» | 141 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В «РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТР «ОБЩИЙ ЭФФЕКТ ВЛИЯНИЯ ОРИЕНТАЦИИ ВОЛОКОН НА КОРОБЛЕНИЕ»..... | 148 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г «РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТР «ОБЪЕМНАЯ УСАДКА» | 155 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Д «РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТР «AIR TRAP» | 162 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Е «РЕЗУЛЬТАТЫ GREY RELATIONAL АНАЛИЗА»..... | 163 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Ж «РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗАЛИВКИ ШЕСТЕРНИ БЕЗ ЗАКЛАДНОГО АРМИРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА»..... | 164 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ З АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ООО "ВНЕДРЕНЧЕСКАЯ ФИРМА "ПЛАДЕП" | 166 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ И АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ООО «ЮМЗ» | 167 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ К АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ АО «КРИОГЕНМАШ» | 169 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Л АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС | 171 |

| | |
|--|-----|
| ПРИЛОЖЕНИЕ М АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ В НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТАХ НОЦ ГДИ-209 «ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ КРИОГЕННЫХ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ И РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ» В РАМКАХ ИСПОЛНЕНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗАДАНИЯ В СФЕРЕ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ (КОД ПРОЕКТА FSSS-2024-2017)..... | 172 |
|--|-----|

ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции развития высокотехнологичных отраслей промышленности, таких как авиационно-космическая, автомобилестроительная, медицинская и электронная, характеризуются активным внедрением полимерных композиционных материалов (ПКМ), сочетающих высокие удельные прочностные характеристики, коррозионную стойкость и технологичность. Инжекционное литье является ключевым и наиболее производительным методом изготовления сложных и точных деталей из ПКМ. Однако, его широкое внедрение сдерживается технологической сложностью процесса, многопараметричностью и сильным влиянием режимных параметров на формирование гетерогенной структуры материала, что, в свою очередь, определяет конечный комплекс эксплуатационных свойств изделия. В этой связи получение качественных изделий из ПКМ приобретает стратегическое значение и обусловлено комплексом технологических, экономических и функциональных факторов.

Актуальность обеспечения качества изделий из ПКМ, получаемых методом инжекционного литья, определяется совокупностью взаимосвязанных факторов современного промышленного производства. В первую очередь, это обусловлено повышением функциональной надежности ответственных конструкций, где изделия из ПКМ перестали быть простой заменой традиционных материалов и стали критически важными компонентами. В авиационных элементах шасси, автомобильных силовых кронштейнах, корпусах медицинских имплантатов и диагностического оборудования любой скрытый дефект может привести к катастрофическим последствиям, что делает гарантированное качество не просто техническим требованием, а обязательным условием допуска продукции к эксплуатации.

Не менее значимым аргументом является экономическая эффективность и конкурентоспособность производства. Высокий процент брака при литье дорогостоящих ПКМ наносит существенный финансовый ущерб, поскольку каждое забракованное изделие означает потери не только материала, но и

энергоресурсов, и машинного времени. Минимизация этих потерь через стабилизацию технологического процесса и обеспечение «правильного изготовления с первого раза» становится ключевым фактором снижения себестоимости и укрепления позиций предприятия на рынке.

Существенным барьером на этом пути выступает технологическая сложность процесса, требующая перехода к предиктивному проектированию. Многопараметричность инжекционного литья ПКМ делает неэффективным традиционный эмпирический подход к настройке оборудования, что приводит к длительному циклу запуска и непредсказуемости результатов. В этой связи переход от реактивного контроля к проактивному управлению качеством на стадии проектирования с использованием CAE-моделирования, позволяющего виртуально прогнозировать и предотвращать дефекты до изготовления оснастки, значительно сократит сроки и стоимость вывода продукции на рынок.

Разработка единого регламента оценки качества литых изделий методом инжекционного литья с использованием CAE-моделирования представляет собой высокоактуальную научно-практическую задачу, что обусловлено наличием значительных пробелов в существующей системе подготовки производства. Анализ современных исследований, включая работы [1] и [2], показывает фрагментарность существующих подходов к применению CAE-моделирования, где демонстрируется эффективность отдельных возможностей технологии без предложения комплексной системы оценки качества получаемой отливки.

Особую остроту проблеме придает отсутствие стандартизированных подходов к использованию "цифровых двойников" в технологической подготовке производства, что отмечается в исследованиях [3] и [4]. Несмотря на признание перспективности технологии цифровых двойников, в научной литературе и производственной практике отсутствуют унифицированные методики их интеграции в процесс оценки качества.

Многочисленные работы, включая [5], демонстрируют эффективность различных методов оптимизации (Тагучи, RSM, GA), однако не предлагают унифицированной схемы их применения в рамках единого регламента. Это

приводит к ситуативному использованию оптимизационных методов без системного подхода к управлению качеством.

Существенной проблемой является отсутствие комплексной квалиметрической оценки результатов CAE-моделирования. Как показано в работах [6], современные CAE-системы предоставляют распределенные параметры, но не дают интегральной количественной оценки, позволяющей принимать сбалансированные решения о приоритете технологических режимов и конструктивных решений.

Экономическая составляющая проблемы подчеркивается в исследованиях [7] и [8], где отмечается, что отсутствие единого регламента приводит к многократным дорогостоящим итерациям при переходе от опытных к серийным пресс-формам. Промышленная потребность в стандартизированных решениях особенно актуальна для предприятий с низкими уровнями технологической зрелости, как справедливо отмечает [9].

Следовательно, **актуальность** диссертационной работы определяется тем, что повышение качества изделий, получаемых методом инжекционного литья, связано с определением необходимых характеристик качества изделий на этапе конструкторско-технологической подготовки в зависимости от требований потребителя и разработкой методов их квалиметрической оценки с использованием CAE-анализа процесса литья.

Степень разработанности темы.

Значительный вклад в решение теоретических и практических вопросов управления качеством внесли российские и зарубежные ученые: Ю.С. Клочков, В.Н. Козловский, Д.И. Панюков, И.Н. Хаймович, А.И. Хаймович, Д.В. Антипов, У. Шухарт, К. Исикава, У.Э. Деминг, Ф.Б. Кросби, В.В. Бойцов, Б.В. Бойцов, В.А. Барвинок, В.Я. Белобрагин, В.А. Васильев, В.Г. Версан, В.Н. Азаров, Г.П. Воронин, В.А. Лapidус, Ю.П. Адлер, Б.С. Мигачев, Дж. Джуран, Г. Тагучи и другие.

Решением вопросов, связанных с конструкторско-технологической подготовкой процесса инжекционного литья, занимались многие отечественные и зарубежные ученые: Збигнев Тадмор, Коста Гогос, Джеймс Л. Уайт, Доранд К.

Баер, Вальтер Майкла, Роджер Т. Кеун, Дэвид О. Казмер, Ханс-Петер Хайман, В.А. Брагинский, В.Г. Бортников, Е.И. Яблочников и другие.

Проведённый обзор литературы свидетельствует о недостаточной разработанности современных подходов к обеспечению качества изделий, изготовленных методом инжекционного литья. В текущих исследованиях отсутствуют комплексные методики на базе процессного подхода к конструкторско-технологической подготовке, объединяющие ранжирование потребительских требований, имитационное моделирование, квалиметрию и планирование виртуальных экспериментов. Таким образом, существует необходимость в разработке новых методов, которые позволят оптимизировать технологическую подготовку производства на основе цифрового мониторинга процессов литья с учетом результатов анализа к специфическим требованиям к изделиям.

Учитывая вышеизложенное, **целью диссертационной работы** является повышение качества изделий из полимерных материалов, получаемых литьем под давлением, за счет совершенствования инструментария подготовки производства, включающего этап цифрового моделирования процесса литья и мониторинга показателей качества отливок на цифровых моделях, полученных на основе анализа потребительских требований к изделиям.

Задачи работы:

1. Провести теоретический анализ существующих подходов к обеспечению качества изделий, изготовленных методом инжекционного литья.
2. Разработать методом QFD ранжированную матрицу соответствия потребительских показателей качества изделий и характеристик процесса формообразования при имитационном моделировании инжекционного литья на примере изделий крышка тары и шестерня.
3. Разработать методику прогноза качества деталей по результатам квалиметрической оценки характеристик процесса формообразования при имитационном моделировании инжекционного литья, определения характеристик качества формообразования на примере изделий крышка тары и шестерня.

4. Разработать методику управления качеством инжекционного литья с использованием планирования эксперимента и средств имитационного моделирования путем анализа характеристик качества процесса формообразования при инжекционном литье за счет выбора технологических параметров литья и рациональной конструкции пресс-формы (система подвод расплава и система охлаждения) на примере изделий крышка тары и шестерня.

5. Разработать регламент подготовки производства, включающий этап цифрового моделирования процесса литья и мониторинг качества отливок на цифровых имитационных моделях, обеспечивающий получение высокоточных полимерных деталей.

Область исследования соответствует следующим пунктам направлений исследований паспорта научной специальности 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства:

п.5. Методы оценки качества объектов, стандартизации и процессов управления качеством;

п.9. Разработка и совершенствование научных инструментов оценки, мониторинга и прогнозирования качества продукции и процессов;

п.13. Научные основы цифровых, автоматизированных комплексных систем управления производством и качеством работ на базе технических регламентов и стандартов.

Объектом исследования является процесс изготовления изделия методом инжекционного литья.

Предметом исследования являются методы квалиметрической оценки и прогнозирования качества продукции с помощью цифровых моделей.

Методы исследования. Решение поставленных задач проведено на основе процессного и системного подходов, метода развертывания функции качества (QFD), серого реляционного анализа, робастного планирования виртуального эксперимента по Тагучи.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в разработке методики подготовки производства изделий, изготовленных методом инжекционного литья, и состоит в следующем:

1. Методика оценки качества изделий при инжекционном литье, отличающаяся от известных решений использованием метода QFD для получения ранжированной матрицы соответствия между потребительскими свойствами изделия и техническими характеристиками инжекционного литья, которые являются целевыми параметрами при оптимизации при цифровом моделировании этого процесса (п. 9 паспорта специальности).

2. Методика получения новых характеристик качества изделий по цифровой модели процесса инжекционного литья, отличающаяся тем, что для учета специфики потребительских свойств литых изделий – одноразовой тары (ключевая характеристика – малая масса) и шестерни насоса (ключевая характеристика – высокая точность) – введены интегральные характеристики процесса формообразования. Они позволяют перейти от физических параметров процесса в каждой точке отливки (температура, усадка, напряжения и т. п.) к общей агрегированной оценке качества отливки, обеспечивая оптимизацию процесса литья на цифровой модели с учетом этих особенностей (п. 5 паспорта специальности).

3. Инструментарий многокритериальной оптимизации параметров инжекционного литья по цифровой модели, основанный на робастном планировании экспериментов Тагучи и сером реляционном анализе, отличающийся тем, что в качестве критериев целевой функции использованы формализованные интегральные характеристики процесса, учитывающие специфичные ключевые параметры качества изделий – одноразовой тары и шестерни насоса (п. 9 паспорта специальности).

4. Модернизированная методика конструкторско-технологической подготовки производства изделий из полимерных материалов методом инжекционного литья, отличающаяся введением в регламент процесса этапов оптимизации конструкции оснащения (пресс-форм) и технологических режимов на

основе цифрового моделирования литья с использованием интегральных характеристик, а также мониторинга показателей качества отливок на цифровых моделях с учетом специфики потребительских свойств изделий. (п. 13 паспорта специальности).

Теоретическая значимость заключается в разработке инструментария предиктивной оценки потребительских свойств изделий при инжекционном литье с использованием метода QFD, который позволяет получать ранжированные матрицы соответствия между характеристиками процесса формообразования и требованиями потребителей, определять на этой основе характеристики качества для имитационного моделирования инжекционного литья и проводить на этой основе оптимизацию проектных решений с использованием полученных характеристик.

Практическая значимость заключается в разработке регламента подготовки производства изделий, полученных методом литья под давлением, включающего этап цифрового моделирования процесса литья и мониторинг показателей качества отливок на цифровых моделях полученных на основе анализа потребительских требований к изделиям.

Разработана и апробирована принципиально новая методика сравнительного количественного анализа эффективности системы охлаждения пресс-форм, влияющая на качество отливки и эффективность инжекционного литья.

Разработана цифровая модель процесса инжекционного литья шестерни из полимерных композиционных материалов, отличающиеся тем, что обеспечивается повышенная точность отливок за счет использования закладных армирующих элементов, препятствующих объемной усадке.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика оценки качества изделий при инжекционном литье, содержащая метод QFD для получения ранжированной матрицы соответствия между потребительскими свойствами изделия и техническими характеристиками инжекционного литья как целевыми параметрами оптимизации при цифровом моделировании.

2. Методика получения новых интегральных характеристик качества изделий по цифровой модели инжекционного литья, учитывающая специфику потребительских свойств литых изделий.

3. Инструментарий многокритериальной оптимизации параметров инжекционного литья по цифровой модели, содержащий методы робастного планирования экспериментов по Тагучи и серого реляционного анализа с интегральными характеристиками качества процесса в качестве критериев целевой функции

4. Модернизированная методика конструкторско-технологической подготовки производства изделий из полимерных материалов методом инжекционного литья, содержащая этапы оптимизации конструкции пресс-форм и технологических режимов на основе цифрового моделирования с учетом специфики потребительских свойств.

Степень достоверности

Достоверность научных положений, выводов и результатов исследования обеспечивается анализом существующих подходов к обеспечению качества изделий, изготовленных методом инжекционного литья, валидацией предложенных моделей и методов, практикой их применения для отдельных организаций.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на конференциях, в том числе: Международной научно-технической конференции имени Н.Д. Кузнецова «Перспективы развития двигателестроения» (г. Самара, 2023 и 2025 г.), Всероссийский научно-технический форум по двигателям и энергетическим установкам имени Н.Д. Кузнецова (г. Самара, 2022 и 2024 г.).

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы в виде модернизированной методики конструкторско-технологической подготовки производства изделий из полимерных материалов методом инжекционного литья, отличающаяся введением в регламент процесса этапов оптимизации конструкции оснащения (пресс-форм) и технологических

режимов на основе цифрового моделирования литья с использованием интегральных характеристик внедрены на ООО «Внедренческая фирма "Пладеп"», что подтверждается актом внедрения от 16.03.2026 г., актом внедрения результатов диссертации на АО «Криогенмаш» от 19.03.2026 г. и актом внедрения результатов диссертации на ООО «ЮМЗ» от 19.03.2026 г. Материалы диссертационной работы нашли применение в учебном процессе Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва (акт внедрения от 17.03.2026 г.). Результаты диссертационной работы использованы при выполнении государственного задания по проекту №FSSS-2024-0017 (акт внедрения от 16.03.2026 г.).

Публикации.

По теме диссертационной работы опубликовано 4 научные работы, из них 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК.

Автор благодарит коллектив кафедры технологий производства двигателей Самарского университета за ценные советы в процессе выполнения работы.

1 ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ЭТАПЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА. ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Литьё под давлением представляет собой высокоскоростной технологический процесс, который используется для изготовления пластмассовых изделий с разной конфигурацией формы, в том числе сложной. Для обеспечения крупносерийного и массового производства пластиковых деталей применяется сложный технологический процесс: расплавленный пластик под высоким давлением впрыскивают в металлическую пресс-форму. Жидкая полимерная масса равномерно распределяется по всему ее объёму и постепенно кристаллизуется, приобретая заданную форму. Благодаря такой технологии удаётся изготавливать изделия высокого качества. Однако, для осуществления литья под давлением используется сложное и дорогое оборудование, которое позволяет обеспечить высокую производительность и стабильность процесса. Такой способ производства позволяет эффективно справляться с большими объёмами. В качестве исходного материала задействуются гранулы термопластов, а также порошки терморезактивных полимеров, которые придают готовым продуктам необходимые физические свойства, такие как прочность, устойчивость к нагрузкам и эксплуатационные качества, соответствующие требованиям применения.

Интересно, что примерно половина всех полимерных деталей, выпускаемых в мире, приходится именно на этот метод формовки.

От работы конструктора зависит, в конечном счете, общая технологичность производства, эффективность технологического процесса, себестоимость и качество продукции. Качество изделия, полученного методом инъекционного литья, зависит от выполнения всех этапов жизненного цикла (ЖЦ) литого изделия – от проектирования до утилизации. Современный подход к производству пластмассовых изделий методом литья под давлением требует от производителей

выполнения так называемого «метода параллельного проектирования». Он подразумевает, что все участники производственного процесса: конструктор изделия, конструктор литейной формы, поставщик материалов и инженер-технолог должны работать совместно, согласовывая друг с другом все принимаемые решения [10].

Технология литья пластмасс под давлением при крупносерийном производстве полимерных изделий выделяется рядом преимуществ, среди которых ключевое место занимает высокая точность формируемых отливок, которая достигается за счет инъекции расплава с высокой скоростью. Такой подход гарантирует равномерное заполнение всей полости пресс-формы, что обеспечивает стабильное качество продукции.

Данный способ широко востребован благодаря множеству сильных преимуществ.

Во-первых, возможность выпуска деталей любой степени сложности, включая тонкостенные изделия. Возможности изготовления зависят от конструкции пресс-формы, которая прорабатывается с максимальной детализацией, учитывая все повороты, изгибы и отверстия конечного изделия.

Во-вторых, отсутствие или минимальный объем последующей механической доработки. Даже для особенно замысловатых форм требуется лишь незначительная обработка

В-третьих, такая технология подходит для массового производства с пресс-форм с большим сроком службы. Металлические пресс-формы служат десятилетиями, позволяя выпустить миллионы полимерных деталей без замены.

Еще одним достоинством является быстрая окупаемость вложений при запуске крупносерийного выпуска. Стоимость единицы продукции снижается по мере роста тиража, при этом качество остаётся неизменно высоким. Это обусловлено единовременными затратами на подготовку производства конкретной номенклатуры.

Термопластавтомат (ТПА) или инжекционно-литьевая машина – это сложное технологическое оборудование, состоящее из рабочих узлов, исполнительных

механизмов и блока управления, а также имеющие температурные, скоростные, нагрузочные и др. параметры [11].

Общую конструкцию термопластавтомата можно представить следующим образом:

- узел впрыска;
- узел смыкания;
- основание;
- система приводных механизмов;
- контроллер.

Узел впрыска (рисунок 1.1) осуществляет загрузку материала, его расплав и подачу к узлу смыкания. В состав узла впрыска входит загрузочный бункер, материальный цилиндр, нагреватели, шнек, сопло. Загрузка полимерного материала осуществляется через загрузочный бункер, далее он поступает в материальный цилиндр, потом вращательными движениями шнека происходит транспортировка материала к соплу. На этом пути материал нагревается и переходит в вязкотекучее состояние.

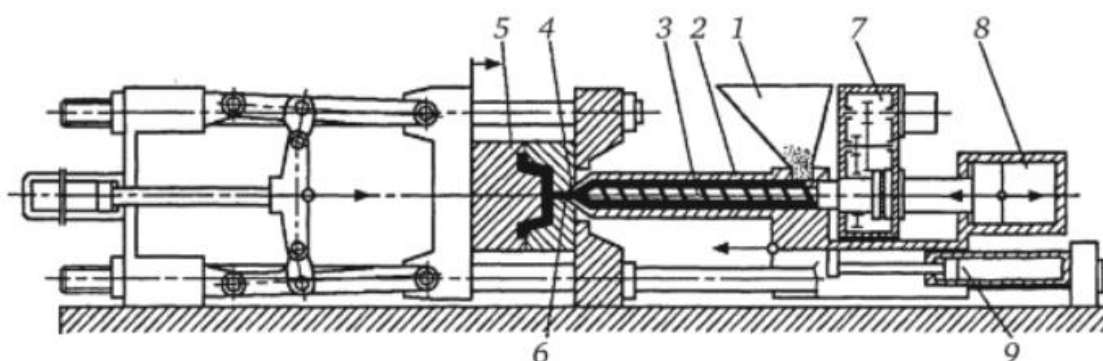


Рисунок 1.1 – Устройство шнекового узла впрыска:

- 1 – загрузочный бункер, 2 – материальный цилиндр, 3 – шнек, 4 – сопло,
 5 – литьевая форма, 6 – литниковое отверстие, 7 – привод вращательного
 движения шнека, 8 – привод возвратно-поступательного движения шнека,
 9 – привод подвода материального цилиндра

В задачу узла смыкания входит закрытие и раскрытие литьевой формы, создание усилия, необходимого для сохранения формы в закрытом виде. Нужное

усилие может быть создано под действием колено-рычажного или гидравлического механизма, а также их комбинации. Конструкция узла смыкания также должна обеспечивать простое извлечение готового изделия.

Основание термопластавтомата – неподвижная часть станка, необходимая для крепления рабочих узлов машины. Оно должно отвечать таким требованиям как жесткость, виброустойчивость, прочность, износостойкость.

Управление работой термопластавтомата происходит с помощью электронного контроллера.

Ниже представлены **основные этапы формообразования при литье изделий под давлением:**

1. *Подача расплава материала в пресс-форму:*

Для того чтобы обеспечить возможность формования материала, его необходимо преобразовать из твердого состояния в текучее. Температура расплавленного материала должна обеспечивать необходимую вязкость для заполнения пресс-формы через сопло ТПА (позиция 5 рисунок 1.2).

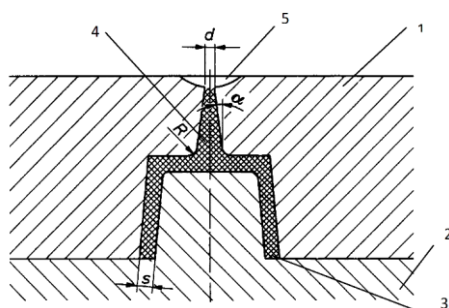


Рисунок 1.2 – Схематичное изображение пресс-формы с центральным литником: α - углы извлечения, d - диаметр впуска центрального литника, 1- неподвижная часть, 2- подвижная часть, 3- формообразующая полость, 4 – центральный литник, 5 – место подвода сопла с расплавом.

2. *Смыкание и впрыск пресс-формы:*

Пресс-форма состоит из подвижной части (пуансон) – позиция 1 (рисунок 1.2) и неподвижной (матрица) – позиция 2. Цикл литья начинается со смыкания пресс-формы, после чего через литниковые отверстия (каналы) в ее полость – позиция 3 через литник – позиция 4 впрыскивается расплавленный материал. В

зависимости от материала и изделия в пресс-форме необходимо поддерживать определенный температурный баланс. Для регулирования температуры формы, как правило, используется вода, которая пропускается через каналы охлаждения.

3. Выдержка под давлением:

После заполнения формы шнек ТПА поддерживает давление впрыска материала, компенсируя его усадку в процессе охлаждения. Усилие смыкания пресс-формы при этом должно быть таким, чтобы предотвратить раскрытие формы под действием высокого давления. На следующем этапе цикла литья шнек начинает вращаться, отодвигаясь в исходное положение. При этом следующая порция расплавленного материала поступает в материальный цилиндр.

4. Открытие формы:

В результате охлаждения пресс-формы деталь застывает, после чего подвижная часть формы отходит назад, раскрывая тем самым пресс-форму. Обычно пресс-форма проектируется таким образом, чтобы после раскрытия деталь гарантированно оставалась на подвижной части формы – пуансоне. С пуансона деталь извлекается с помощью системы выталкивания.

Параметры термопластавтоматов играют ключевую роль в инъекционном литье, определяя ход процесса и влияя на итоговое качество получаемых отливок. Эти характеристики позволяют точно контролировать процесс формирования изделия, минимизировать дефекты и добиться требуемых свойств полимера.

Критически важными являются следующие характеристики:

- температура впрыска – отвечает за текучесть расплава и равномерность заполнения формы;
- температура пресс-формы – влияет на скорость охлаждения и кристаллизацию материала, обеспечивая гладкую поверхность;
- давление впрыска – определяет скорость и полноту наполнения полости, предотвращая пустоты;
- давление подпрессовки – компенсирует усадку полимера, повышая плотность и точность размеров;

- время выдержки под давлением – гарантирует стабилизацию формы перед извлечением изделия;
- время цикла – оптимизирует общую производительность и энергоэффективность процесса;
- усилие смыкания пресс-формы – предотвращает вытекание расплава и обеспечивает герметичность;
- жесткость пресс-формы – минимизирует деформации, сохраняя геометрию сложных деталей.

1.2 АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ ПРОСТЫХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ДЛЯ ЗАДАЧ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕКЦИОННОГО ЛИТЬЯ

По мере развития экономической сферы в России все большее внимание уделяется качеству. В настоящее время одной из серьезных проблем для российских предприятий является создание системы качества, обеспечивающей производство конкурентоспособной продукции.

Качество – сложное и многогранное понятие. Гарвин [12] рассмотрел восемь различных аспектов качества изделия: технические параметры, функциональные возможности, надежность, соответствие предъявляемым требованиям, долговечность, ремонтпригодность, эстетичность и воспринимаемое качество. Важность отдельных аспектов управления качеством изменяется в зависимости от характера изделия и потребностей заказчика. Поэтому специфика понятия качества изменяется в зависимости от условий использования изделия. Универсального определения качества, которое могло бы отразить все аспекты этого понятия, нет [13].

ГОСТ 15467-79 Управление качеством продукции устанавливает основные понятия, термины и определения. Качество продукции – совокупность свойств продукции, определяющих ее способность удовлетворять определенные потребности в соответствии с назначением [14].

На рисунке 1.3 представлена схема зависимости требований, предъявляемых к качеству литых изделий, от требований к конструкции изделия, материалу, из которого оно изготовлено, и технологии изготовления. Выбор технологии производства изделий из полимерных материалов многообразен и определяется серийностью, требуемым качеством, геометрией и формой изделия. Поскольку изготовление деталей более сложная задача в связи с повышенными требованиями к точности и качеству поверхностей, то возникают определенные ограничения на применение той или иной технологии [1, 15]. В данном исследовании выбор технологии ограничивается инжекционным литьем термопластов.

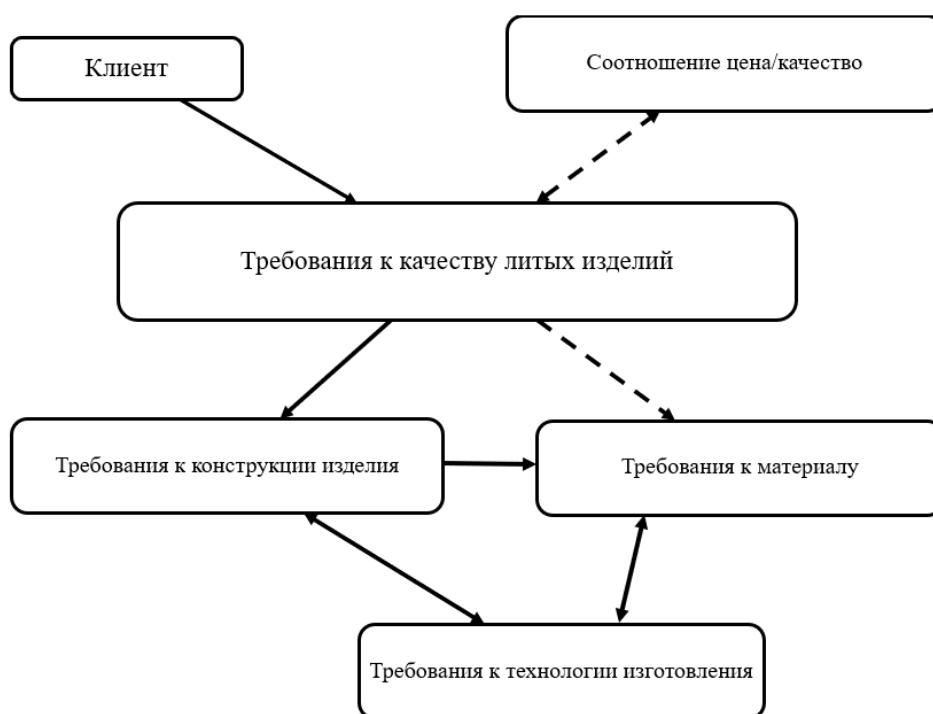


Рисунок 1.3 – Схема зависимости требований, предъявляемых к качеству литых изделий

Инструменты управления качеством имеют особое значение в процессе литья под давлением, способствуя повышению эффективности всего производства. Для оптимизации этапов подготовки производства используются проверенные методы контроля качества, которые обеспечивают оперативный сбор и анализ данных о ходе технологического процесса [16].

В системе менеджмента качества применяется широкий спектр подходов, различающихся по объектам применения, целям и принципам реализации. Такие классификации позволяют адаптировать инструменты под конкретные задачи, будь то мониторинг параметров или анализ дефектов. Это разнообразие помогает поддерживать стабильное качество продукции на всех уровнях.

Инструменты качества – это различные методы и техники по сбору, обработке и представлению количественных и качественных данных какого-либо объекта [17, 18]. Они позволяют создать условия для эффективного принятия решения. Инструменты контроля качества основаны на методах математической статистики. Методы с применением статистического аппарата требуют глубоких знаний в этой области, а также хорошей подготовки специалистов в области качества, так как от них зависит, насколько грамотно инструмент будет реализован [19]. Наиболее часто применяемые методы – это «семь основных инструментов качества»: контрольный листок, диаграмма Парето, причинно-следственная диаграмма, диаграмма рассеяния, гистограмма, стратификация, контрольные карты [20]. На рисунке 1.4 представлена краткая характеристика данных инструментов управления качеством [21]. Логика использования этих методов выглядит следующим образом:

- сбор информации: контрольный листок, контрольная карта;
- проверка на отклонения: контрольная карта, гистограмма;
- определение приоритетного фактора: стратификация, диаграмма Парето;
- исследование причин: причинно-следственная диаграмма, диаграмма разброса;
- разбор дефектов: диаграмма Парето.

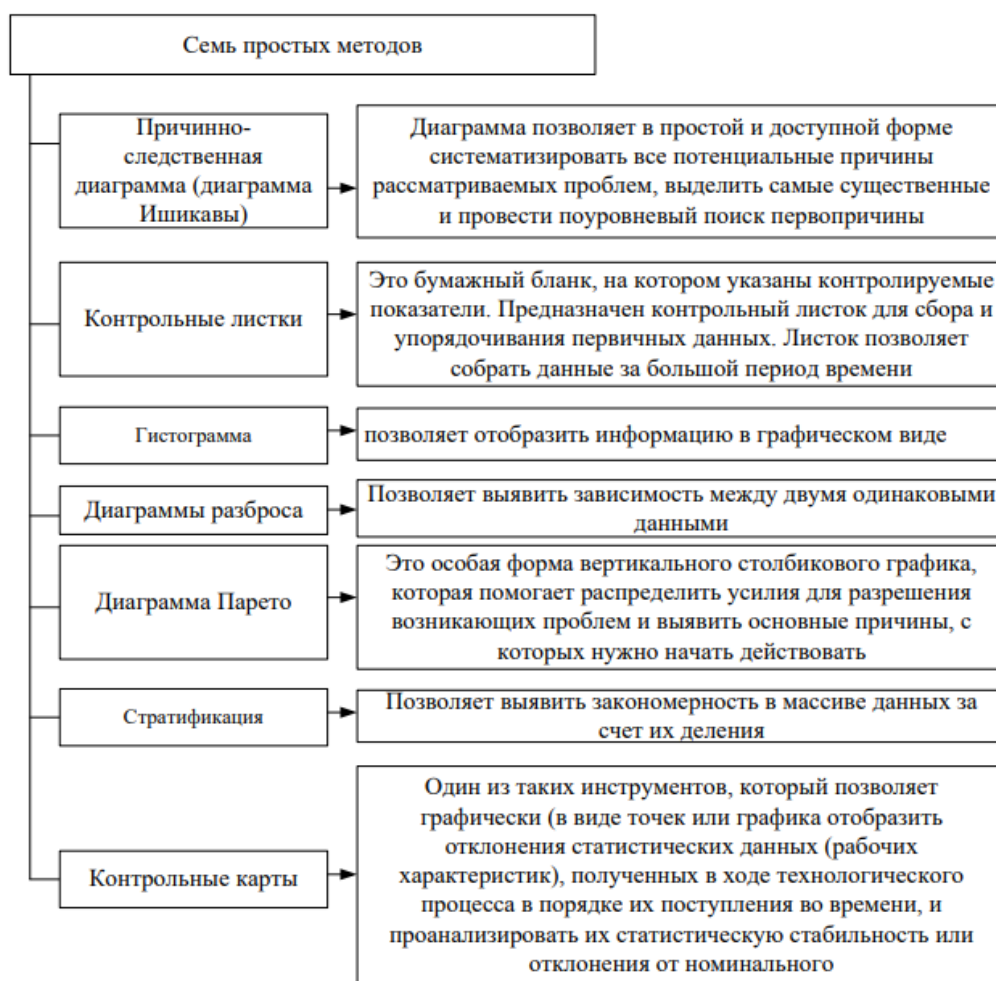


Рисунок 1.4 – Краткая характеристика простых методов управления качеством

В рамках теории управления качеством выделяется «семь современных инструментов контроля качества», среди которых: диаграмма сродства, диаграмма связей, древовидная диаграмма, матричная диаграмма, сетевой график, диаграмма принятия решений и матрица приоритетов [23].

Для анализа качества, применяют такие инструменты, как:

- функционально-физический анализ,
- функционально-стоимостной анализ;
- анализ причин и последствий отказов (FMEA-анализ) [24].

Все категории методов в комплексе могут повысить эффективность деятельности предприятия и качество продукции [25]. Но каждый метод в отдельности, также может дать положительный результат.

Управление качеством на этапе конструкторско-технологической подготовки (КТП) производства изделий методом инжекционного литья требует комплексного подхода с использованием взаимодополняющих методов. Наибольшую эффективность демонстрируют проактивные методы, позволяющие предупреждать дефекты на стадии проектирования. К ним относится метод FMEA-анализа, который обладает высокой применимостью как для конструкторской, так и для технологической подготовки. На этапе проектирования изделия FMEA-анализ позволяет выявлять потенциальные отказы, связанные с конструктивными особенностями, такими как концентраторы напряжений и неравномерная толщина стенок. При технологической подготовке FMEA процесса эффективен для анализа рисков дефектообразования, включая недолив, коробление и несплошности, что позволяет сформировать перечень критических параметров качества для последующего контроля.

Статистические методы управления качеством, такие как методы Тагути и регрессионный анализ, показывают ограниченную, но целенаправленную применимость для оптимизации параметров литья и установления связей между параметрами процесса и качеством изделия. В отличие от статистического управления процессами (SPC (англ. Statistical Process Control)), который более эффективен на этапе серийного производства, эти методы позволяют целенаправленно настраивать процесс на этапе его подготовки. Для подготовки производства новой продукции можно использовать в некоем модернизированном виде причинно-следственные связи (диаграммы Ишикавы) и стратификацию.

Квалиметрические методы, включая разработку деревьев свойств и определение весовых коэффициентов, демонстрируют среднюю применимость, требуя привлечения экспертных оценок и статистических данных. Тем не менее, они обеспечивают системный подход к формированию критериев качества. Стоимостной анализ, тесно интегрированный с FMEA-анализом, обладает высокой применимостью для оценки экономических последствий потенциальных дефектов и оптимизации точности изготовления с учетом затрат.

Перспективными являются интегрированные подходы, такие как Quality Function Deployment (QFD) (Развертывание функции качества) для перевода требований заказчика в технические характеристики, а также Design for Manufacturability (DFM)/Design for Assembly (DFA) (Проектирование для изготовления/сборки) для одновременного проектирования изделия и технологии. Эти методы обеспечивают сквозное проектирование, учитывающее требования качества на всех этапах.

Особое значение имеют методы инженерного анализа (CAE-расчеты), демонстрирующие очень высокую применимость на этапе конструкторско-технологической подготовки производства (КТПП). Например, анализ заполнения позволяет прогнозировать поведение расплава и выявлять зоны образования сварных линий, термический анализ обеспечивает оптимизацию системы охлаждения, а структурный анализ дает возможность оценивать прочность и жесткость изделия до изготовления оснастки. Преимущество CAE-моделирования заключается в возможности виртуальной оптимизации технологических параметров, что существенно сокращает количество дорогостоящих физических экспериментов.

На основании всего вышперечисленного можно составить причинно-следственную диаграмму Исикавы (рисунок 1.5). Данная диаграмма описывает отношения типа «причина – результат» [26, 27, 28]



Рисунок 1.5 – Причинно-следственная диаграмма Исикавы

Технологические параметры процесса литья являются управляющими параметрами, определяющими показатели качества отливки. Варьируя эти управляющие параметры, можно достичь лучшего качества получаемого изделия.

1.3 АНАЛИЗ НЕСООТВЕТСТВИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ОТЛИВКАХ ПРИ ИНЖЕКЦИОННОМ ЛИТЬЕ

Понятие «несоответствие» – фундаментальная категория систем менеджмента качества (СМК), регламентированная международными и национальными стандартами. Точное понимание и применение этого понятия формируют основу эффективного менеджмента качеством продукции и процессов. Оно определено в нормативных документах и стандартах по качеству.

Международный стандарт ISO 9001 содержит требования к обработке несоответствий (п. 10.2 «Несоответствия и корректирующие действия»). Стандарт ISO 31000 описывает управление рисками, включая выявление потенциальных несоответствий.

Несоответствие в СМК – ситуация, когда продукт, процесс или система не отвечают установленным требованиям. Оно классифицируется следующим образом:

1. Несоответствие продукции: когда готовый продукт не соответствует заявленным характеристикам или требованиям потребителя. Это может быть связано с дефектами, неправильной упаковкой или несоответствием стандартам безопасности.

2. Несоответствие процессов: когда производственный процесс не выполняется в соответствии с установленными процедурами или стандартами, что может привести к снижению качества продукции.

3. Несоответствие документации: когда документация (например, инструкции, стандарты, записи) не соответствует фактическим процессам или продуктам, что может затруднить контроль качества.

4. Несоответствие ожиданиям клиентов: когда продукт или услуга не удовлетворяют ожиданиям и потребностям клиентов.

Важность управления несоответствиями заключается в том, что они могут привести к снижению удовлетворенности клиентов, увеличению затрат на исправление ошибок и ухудшению репутации компании. Для управления несоответствиями в СМК используются различные методы и инструменты, такие как:

- анализ причин и последствий (RCA): помогает выявить коренные причины несоответствий;
- корректирующие и предупреждающие действия (CAPA): процессы, направленные на устранение причин несоответствий и предотвращение их повторения;
- мониторинг и оценка процессов: регулярная проверка и анализ процессов для выявления отклонений.

Эффективное управление несоответствиями является ключевым элементом для поддержания высокого уровня качества и удовлетворенности клиентов.

Инжекционное литье представляет собой сложный технологический процесс, характеризующийся многофакторностью и нелинейной зависимостью между параметрами процесса и качеством готовой продукции. Возникающие в отливках несоответствия можно систематизировать по нескольким ключевым категориям, требующим комплексного подхода к анализу и устранению.

Наиболее распространенными дефектами являются дефекты внешнего вида и геометрии, включая коробление (нарушение геометрии вследствие неравномерной усадки), усадку (отклонение размеров от проектных значений), неспрессовки (локальные уплотнения материала), а также следы от литников и линий смыкания формы [1, 29]. Не менее значимыми являются внутренние дефекты структуры: поры и пустоты (газовые включения в толще материала), остаточные напряжения, снижающие прочность изделия, и неоднородность распределения наполнителя в композитных материалах [29]. Подобные дефекты сказываются не только на качестве внешнего вида отлитого изделия, но могут привести к ухудшению эксплуатационных характеристик, дефекту структуры и уменьшению срока службы изделия, что делает изучение этих процессов наиболее актуальной проблемой в настоящее время.

Конструктивные особенности деталей из пластмасс обусловлены физико-механическими и технологическими свойствами и способами их получения. Прочностные и точностные характеристики пластмассовых деталей во многом зависят от их конструктивного оформления.

Существует множество попыток классифицировать возможные дефекты пластмассовых изделий, проявляющихся при литье под давлением, причем наибольшее внимание уделяется влиянию на качество отлитого изделия параметров режима литья (температуры и давления в различных точках литьевой формы, скорости впрыска, интенсивности охлаждения и т.д.), а также реологических свойств материала. Но во многих случаях источник проблем приходится искать в несбалансированной конструкции изделия из ПКМ, либо нерационально спроектированной литьевой форме, поэтому очень уместным

может оказаться разделением причин возникновения дефектов литейных изделий на конструктивные, технологические и сырьевые [29].

Можно выделить следующие характерные технологические дефекты:

1. Недолив выражается в неполном оформлении изделия. Основной его причиной является недостаток материала, поступающего в литейную форму (из-за низкой температуры формы или расплава и, следовательно, пониженной текучести расплава, а также по причине засорения литникового и разводящих каналов). Данный вид дефекта является недопустимым, поэтому для предотвращения недолива необходимо подобрать оптимальные параметры процесса инъекционного литья. Выполнить такой подбор параметров, а также спрогнозировать дефект недолива можно с использованием САЕ-анализа технологического процесса изготовления отливки.

2. Перелив вызывает образование грата в месте смыкания формы. Он возникает при неправильной работе дозирующего устройства, перегреве расплава и литейной формы, недостаточном усилии смыкания формы.

3. Стыковые швы – видна кривая линия спаев отдельных потоков, механическая прочность резко снижена в месте спаев. Основными причинами образования стыковых швов являются: сниженная температура расплава или формы, неудачная конструкция формы [30], приводящая к охлаждению отдельных потоков расплава до момента их слияния (вследствие чего не происходит полного сваривания), а также недостаточное удельное давление расплава. Присутствие такого дефекта в отливке изделия не допускается, возможно его спрогнозировать при использовании САЕ-систем для инженерного анализа.

4. Вздутия на поверхности и пузыри (пустоты) в массе изделия наблюдаются при повышенном содержании летучих компонентов, которые вспучивают мягкую поверхностную пленку при перегреве расплава, сопровождающимся частичной деструкцией и значительным газовыделением. Поверхность вздутия образуется также при недостаточном охлаждении изделия. Данный вид дефекта недопустим для обеспечения качественной отливки.

5. Воздушные ловушки – образование пузырьков воздуха или газа во время заполнения полости пресс-формы расплавом ПКМ. Их возникновение зависит от конструкции детали и пресс-формы [30]. Часто они возникают на концах ребер жесткости, т.е. в местах глухих, глубоких пазов, что приводит к недоливу или к образованию темных пятен (прижогу). Для обеспечения качества изделия необходимо контролировать образование воздушных полостей в отливке. Современные системы САЕ-анализа позволяют визуально просчитать возможности образования воздушных ловушек.

6. Усадочные раковины – значительные углубления на поверхности изделий возникают вследствие повышенной усадки при перегреве массы и недостаточном поступлении расплава (снижено удельное давление расплава или мало сечение впускных каналов). Иногда поверхностные раковины появляются при неравномерном распределении температуры в форме и при дефектах в ее вентиляции.

7. Коробление готовых изделий возникает из-за значительных напряжений внутри изделия, обусловленных большой разностью температур в отдельных частях формы, а также при недостаточной выдержке изделия в литейной форме, отчего оно извлекается недостаточно жестким.

Коробление или деформация детали (прогиб, скручивание и т.п.) в основном происходит из-за различной усадки материала в отлитой детали, на которую влияет ориентация, уплотнение и охлаждение материала в процессе литья. Усадка, больше на недоуплотненном участке детали или на участке, где материал ориентирован в одном направлении. Этот дефект не всегда проявляется сразу же после отливки. Покоробленная деталь может выглядеть не эстетично или не сможет выполнять своих эксплуатационных функций. Чтобы избежать коробления необходимо иметь достаточно жесткую деталь (ребра жесткости, скругления, фаски) и минимизировать различия в усадке материала на стадии дизайна и проектирования. Максимальная величина коробления в зависимости от величины проверяемого размера нормируется отраслевым стандартом [31]. При использовании средств САЕ-систем можно проанализировать и спрогнозировать возможное коробление

отливки, а также найти способы уменьшения или исключения возможности коробления.

8. Трещины образуются вследствие значительных остаточных напряжений в изделии, а также при его прилипанию к стенкам формы.

9. Риски, царапины, сколы на поверхности изделий возникают при неисправном состоянии оформляющей поверхности формы и неаккуратном обращении с готовыми изделиями.

10. «Мороз» – узоры, напоминающие зимнюю разрисовку оконных стекол. Основная причина их появления – попадание влаги в форму при недостаточной сушке гранулята и дефектов в вентиляции формы.

11. Расслоение наступает при повышенном содержании влаги в литьевом материале и при наличии отвердевших литников, не совмещающихся с основным материалом. Если отслоение выражено в виде очень мелких блесков, его называют серебристостью.

12. Разнотонность – неодинаковая поверхностная окраска изделия – объясняется недостаточно одинаковым окрашиванием или разложением красителя из-за его термической нестойкости или перегрева расплава.

13. Размерный брак – отклонение от номинальных размеров, превышающее установленный допуск; наблюдается при чрезмерной усадке или неудачной конструкции литьевой формы. Государственный стандарт [32] устанавливает поля допусков и предельные отклонения для гладких сопрягаемых и несопрягаемых элементов деталей из пластмасс с номинальными размерами до 3150 мм. Для деталей из пластмасс должны применяться поля допусков и посадки по стандартам на допуски и посадки, перечисленным в приложении 1 ГОСТ 7713-62 [33], а также дополнительные поля допусков, устанавливаемые стандартом [34]. Данный вид брака является недопустимым, однако, используя компьютерный анализ (САЕ-анализ) можно спрогнозировать процент усадки отливки, тем самым появляется возможность корректировки технологического процесса и оснастки для получения качественного изделия.

Большинство дефектов отливок можно спрогнозировать и предотвратить с помощью использования имитационного моделирования процесса литья, применяя современные методы САЕ-расчетов.

На рисунке 1.6 представлена схема использования САЕ-систем при определении оптимальных параметров процесса литья для получения качественной отливки.

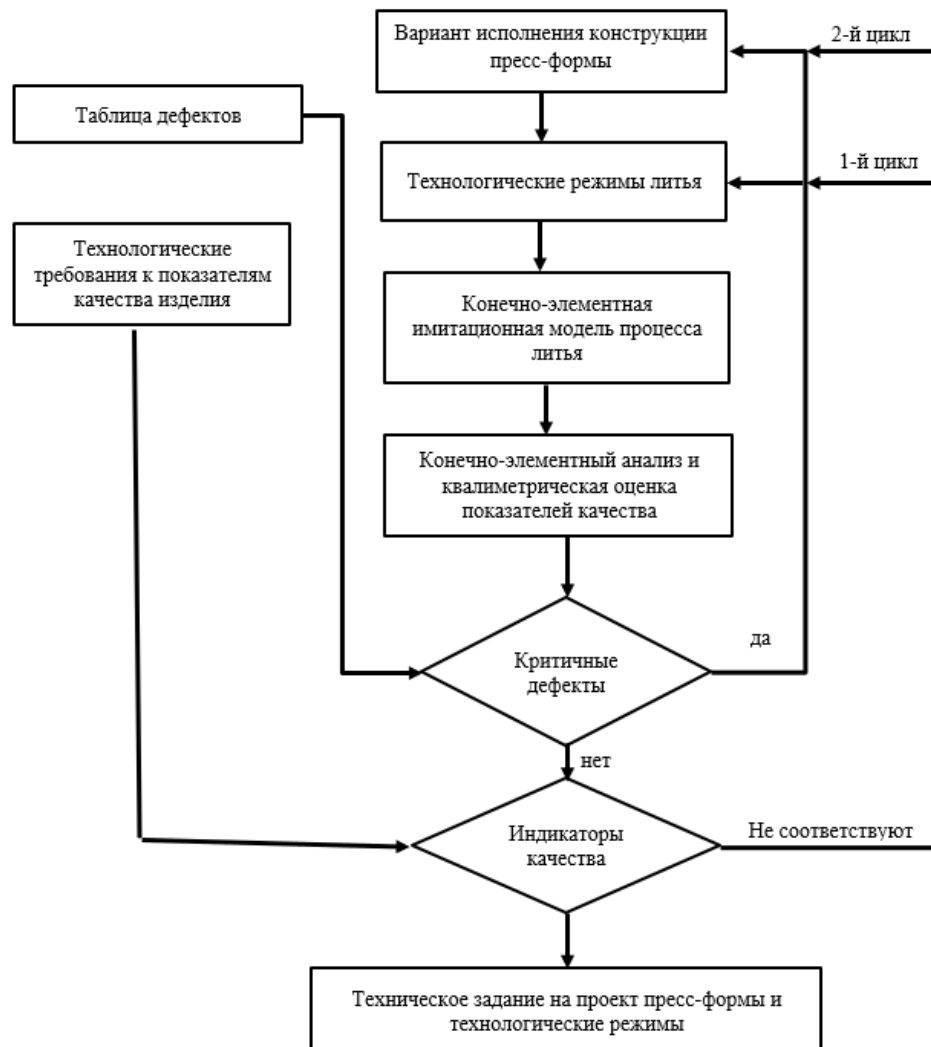


Рисунок 1.6 – Схема использования САЕ-анализа при решении задачи ранней диагностики

САЕ-анализ даёт конструкторам и инженерам существенные возможности, позволяя моделировать различные сценарии литья в виртуальной среде, минуя затраты на материалы и последующую механическую обработку. Такой подход

помогает отсеивать неподходящие концепции или конструкции ещё на этапе проектирования, устраняя потенциальные несоответствия параметрам качества до запуска реального производства.

С помощью виртуального моделирования процесса формообразования инженеры способны оперативно оценивать, как изменения отдельных параметров литья – от геометрии изделия и пресс-формы до технологических режимов – скажутся на качестве получаемых деталей и общей производительности. Автоматизированное проектирование (САЕ) расширяет горизонты: оно позволяет глубоко проанализировать влияние разных вариантов расположения заливных каналов, литниковых систем, особенностей формы изделия, условий литья и последующей доработки на технологичность процесса и конечные свойства продукции.

В отличие от классического подхода «проб и ошибок», где создание прототипов, их тестирование и доработки занимали недели, имитационное моделирование процесса формообразования сокращает этот цикл в несколько раз, ускоряя разработку и минимизируя риски [1].

1.4 АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛА САЕ-СИСТЕМ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ЛИТЬЯ НА ЭТАПЕ КТПП

Диагностика дефектов литья происходит с использованием технологии «цифровых двойников», которая с помощью численных моделей имитирует процесс инжекционного литья. Появление «цифровых двойников» стало логичным результатом развития концепции «цифрового производства». Впервые понятие цифровой двойник было введено профессором Технологического Университета Флориды Майклом Гривза [35] на докладе на мероприятии, посвященном созданию Центра управления жизненным циклом продукта при Мичиганском университете (2002 год), предложенная им концепция приводилась в контексте управления жизненным циклом изделия и предполагала преодоление разрыва между процессами эксплуатации, производства и разработки при помощи цифрового образа объекта [36]. В основе концепции – предпосылка, что для каждой системы

можно создать представление в виде двух систем – физической и виртуальной, включающей всю информацию о физической системе. При этом происходит постоянное «зеркальное отображение»: виртуальная система «отображает» реальную, и наоборот. Все возможные несоответствия, которые могут возникнуть при инъекционном литье, необходимо разделить на две группы: несоответствия, которые могут быть диагностированы средствами инженерного анализа, и несоответствия, которые сложно поддаются диагностике при помощи CAE-моделирования. Перечень возможных дефектов литьевых изделий и способы их устранения, а также возможность их ранней диагностики на этапе КТПП средствами CAE-анализа дополняют сведения, приведенные в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Перечень технологических дефектов литьевых изделий и возможность их прогнозирования на этапе подготовки производства

| Дефект | Причины дефекта | Способы устранения | Возможность ранней диагностики на этапе КТПП средствами CAE-анализа |
|--|--|--|---|
| Полосы и продолговатые пузыри на поверхности изделия | Влажность материала | Подсушка сырья | нет |
| Матовые пятна на поверхности изделия | Перегрев расплава | Понижение температуры расплава; полирование литниковых каналов | нет |
| Темные полосы на поверхности изделия | Местный перегрев материала; наличие мертвых зон в цилиндре и сопле | Понижение температуры расплава; ликвидация мертвых зон | нет |

Продолжение таблицы 1.1

| | | | |
|--|---|---|-----------------------------|
| Пустоты изделия | Сильный нагрев (в результате сжатия) воздуха, попавшего в форму | Улучшение условий выхода воздуха из полости формы; уменьшение скорости впрыска и снижение температуры материала | есть, с помощью САЕ-анализа |
| Местный пережог детали | Сильный разогрев попавшего в форму воздуха, сжатие его и, как следствие, пережог материала | То же | нет |
| Темные разводы и воздушные пузыри | Своевременно не удален попавший в цилиндр воздух | Повышение давления пластикации | есть, с помощью САЕ-анализа |
| Загрязнение изделия | Попадание в материал посторонних частиц или наличие задиров на поверхности цилиндра, поршня или червяка | Контроль за чистотой материала, попадающего в бункер; проверка поверхностей, соприкасающихся с материалом | нет |
| Пленка или пятна на поверхности изделия | Соприкосновение расплава с материалом, чрезмерная смазка формы | Проверка чистоты инжекционного цилиндра; очистка формы, уменьшение смазки | нет |
| Волнистая поверхность удаленной от литника части изделия | Охлаждение расплава в процессе течения | Повышение температуры материала и скорости впрыска | есть, с помощью САЕ-анализа |
| Линии на поверхности деталей | Нарушение течения материала, неравномерное заполнение формы | Проверка режима заполнения формы; при необходимости - изменение размеров литников и их расположение | есть, с помощью САЕ-анализа |

Продолжение таблицы 1.1

| | | | |
|-------------------------------|--|--|-----------------------------|
| Пузыри в виде белых включений | Высокая температура цилиндра и низкое давление литья, недостаточное время выдержки материала в форме под давлением | Снижение температуры цилиндра, повышение давления литья и времени выдержки под давлением, увеличение размеров литников или литниковых каналов для снижения потерь давления | есть, с помощью САЕ-анализа |
| Швы и складки около литника | Излишне быстрое охлаждение расплава на участке вблизи литника | Повышение температуры формы вокруг литника, увеличение размеров литниковых каналов | есть, с помощью САЕ-анализа |
| Сварные швы | Чрезмерное охлаждение расплава при заполнении формы | Повышение температуры формы и материала, скорости впрыска давления литья, изменение расположение литника (для изменения направления течения расплава) | есть, с помощью САЕ-анализа |
| Грат на изделии | Недостаточное усилие запирающей формы, нарушение параллельности соприкасающихся поверхностей форм | Увеличение усилия запирающей формы или снижение скорости впрыска и давления формования; проверка правильности затяжки колонн при образовании грата с одной стороны изделия; уменьшение загружаемой порции материала; проверка параллельности соприкасающихся поверхностей формы; уменьшение вторичного давления формования | нет |

Продолжение таблицы 1.1

| | | | |
|---|--|---|-----------------------------------|
| Отслаивания наружного слоя детали | Включение посторонних материалов. Избыточное значение разности температур расплава и формы | Очистка цилиндра и сопла от посторонних материалов | нет |
| Затруднение при съеме изделий, деформация изделий при съеме | Неправильный режим литья, неправильная конструкция формы | Уменьшение давления литья, увеличение конусности стенок формования или сердечников, полирование поверхностей формы, обеспечение воздушных зазоров, сталкивание изделий воздухом (во избежание образования вакуума) | нет |
| Коробление | Неправильный режим литья, неправильная конструкция формы | подбор оптимальных параметров литья; оптимально спроектированная пресс-форма и литниковая система | есть, с помощью САЕ-анализа |
| Усадка | Неправильный режим литья, неправильная конструкция формы | подбор оптимальных параметров литья; оптимально спроектированная пресс-форма и литниковая система | есть, с помощью САЕ-анализа |

Имитационное моделирование процессов формообразования полимерных материалов объединяет комплекс технологий, основанных на численных методах, таких как метод конечных элементов или конечных разностей. Для разрабатываемых литейных изделий и пресс-форм оно даёт возможность на этапе подготовки производства предварительно оценить технологичность конструкции и предсказать несоответствия характеристикам качества готовой продукции. САЕ-анализ учитывает специфику поведения материала в процессе формообразования,

параметры литьевого оборудования, что помогает оптимизировать производство и избежать типичных несоответствий вроде усадки или неравномерного заполнения. Такой подход значительно повышает надёжность и эффективность проектирования.

С одной стороны перед CAE-анализом ставится задача «увидеть» возможные дефекты, возникающие в отливке в процессе инъекционного литья, с другой стороны – процесс оптимизации, который заключается в выборе критериев, по которым можно сравнить различные вариации параметров инъекционного литья. Отсутствие дефектов – нецелевая функция, это ограничения, принимаемые при выборе оптимальных параметров литья, т.к. дефектов вообще быть не должно. А оптимальным параметром может служить время, за которое изготавливается заготовка. Так как данный параметр будет влиять на стоимость изделия.

Компьютерное моделирование инъекционного литья преследует несколько ключевых целей [2]:

- разработку практичных, экономичных и адаптированных под условия конкретного производства мер по устранению предсказуемых несоответствий характеристикам качества – путём оценки технологических параметров, формы изделия, конструкции пресс-формы, типа материала и настроек оборудования;
- предпочтение конструкторско-технологических решений, повышающих надёжность процесса к вариациям свойств сырья, режимов оборудования, внешней среды и даже погрешностям моделирования;
- оптимизацию конструкции изделия и пресс-формы для минимизации производственных затрат.

Такие симуляции позволяют выявлять и корректировать на этапе подготовки производства проблемы, связанные с особенностями изделий и его формы, поведением материала в технологии и эксплуатации, а также возможностями оборудования. Доступен обширный ассортимент специализированного

программного обеспечения с разными алгоритмами; основные САЕ-системы перечислены в таблице 1.2 [37].

Таблица 1.2 - Системы имитационного моделирования процесса формообразования для анализа процесса литья

| Название системы анализа | Фирма-разработчик | Год основания компании | Технология анализа | Сайт |
|--------------------------|--|--------------------------------|---------------------------|--|
| 3D TIMON | Toray Engineering Co. (Япония) | 1996 | 3D | www.3dtimon.com |
| Cadmould | Simcon Kunststofftechnische Software GmbH (Германия) | 1988 | 2.5D | www.simcon-worldwide.com |
| САРА, MAPS-3D | VMTech Co., Ltd. (Южная Корея) | 1990 | 2.5D (САРА), 3D (MAPS-3D) | www.vmtch.co.kr |
| Moldex 3D | CoreTech System Co. (Тайвань) | 1995 | 3D | www.moldex3d.com www.inmolding.ru |
| Moldflow | Autodesk, Inc. (США) | 1978 (Moldflow Pty. Ltd.) | 2.5D, 3D | www.autodesk.ru , usa.autodesk.com |
| REM3D | Transvalor S.A. (Франция) | 1990-е | 3D | www.transvalor.com |
| Sigmasoft | SIGMA Engineering GmbH (Германия) | 1998 | 3D | www.sigmasoft.de |
| Simpoe-Mold | SIMPOE SAS (Франция) | 2004 | 2.5D, 3D | www.simpoe.com |
| VISI Flow | Vero USA, Inc. (США) | 1978 (Plastics&Computers Ltd.) | 3D | www.veroint.com |

Имитационное моделирование процесса формообразования эффективно помогает в диагностике источников несоответствий характеристикам качества, а также осуществить подбор стратегий их устранения, особенно когда недостатки

качества проявляются уже после разработки и изготовления литьевой формы. Здесь основной акцент делается на разработке решений по доработке изделия при наименьших вмешательствах в конструкцию пресс-формы.

Системы типа Moldex3D дают полную симуляцию производственного цикла, начиная с впрыска расплава и фазы подпрессовки, охлаждения, деформации и усадки. Они также охватывают инновационные технологии, такие как литьё с закладными элементами, многослойное литьё, производство оптических компонентов и заливку корпусов для микрочипов [37].

При этом верность прогнозов симуляции определяется не только качеством софта, но и особенностями реологического поведения полимера, многообразием компаундов и их составов. Совпадение расчёта с реальностью для конкретного полимера и формы не обеспечивает аналогичной точности при смене материалов или параметров процесса.

Вместе с тем точность анализа процесса литья не определяется одним лишь выбранным программным продуктом. Проблема точности прогнозирования связана со сложностью поведения полимерного материала в этом процессе, а также многообразием используемых на практике материалов и композиций на их основе. Хорошее соответствие модели и эксперимента для конкретной марки полимерного материала и геометрии детали не гарантирует точности расчета для других материалов и условий [2, 38, 39]. По результатам виртуального моделирования процессов литья, оценивается характер и полнота заполняемости формы, что во многом зависит от реологических свойств материала. Если при этом оказывается, что невозможно изготовить изделие из данного материала, то принимается решение о его замене, изменении технологических режимов литья или даже изменении конструкции изделия [2].

Для решения подобных задач необходимо, чтобы CAE-система удовлетворяла следующим минимальным требованиям:

- CAE-система должна позволять моделировать различные процессы на всех этапах процесса литья и физические процессы, возникающие в процессе литья.

- САЕ-система должна имитировать работу термопластавтомата и пресс-формы.
- САЕ-система должна позволять получать данные о состоянии расплава в процессе литья.
- САЕ-система должна позволять оценить эффективность системы охлаждения и подвода расплава.
- САЕ-система должна позволять получить характеристики процесса такие, как усадка материала; значения остаточных напряжений, возникающих в отливке; значения температур в начале и конце процесса; значения оптимальных характеристик изделия и т.д.

В общем САЕ-системы представляют собой набор автоматизированных алгоритмов, методик, баз данных и прочего, существенно расширяющих возможности специалиста по оценке технологического процесса литья под давлением, последующей обработки и поведения литьевой детали при эксплуатации. Результаты расчетов в современных САЕ-системах представляют собой визуализацию в различной форме: диаграммы, распределение параметров по сечениям и поверхности отливок в численной и цветовой индикации. Характерной чертой такой информации является представление рассчитанных параметров в привязке к материальным точкам геометрии отливки. Такое представление не всегда дает полной (интегральной) картины, позволяющей принять сбалансированное решение о влиянии анализируемых параметров на показатели качества отливаемого изделия. Решить данную проблему позволяет создание цифровых двойников процесса.

Из ГОСТ Р 57700.37–2021 [40], который касается цифровых моделей и цифровых двойников, можно выделить следующие ключевые понятия.

Цифровая модель представляет собой абстрактное представление физического объекта, системы или процесса, созданное с использованием цифровых технологий. Она включает в себя данные о характеристиках, поведении и взаимодействиях элементов модели. Такая модель может включать различные уровни детализации, от высокоуровневого описания процессов до

детализированных параметров отдельных компонентов. Это позволяет проводить анализ, симуляцию и оптимизацию. Цифровые модели используются в различных областях, таких как проектирование, производство, управление проектами и операциями. Они помогают в визуализации, анализе данных и принятии решений.

Цифровой двойник – это динамическая цифровая реплика физического объекта или системы, которая обновляется в реальном времени на основе данных, получаемых от сенсоров и других источников информации. Он отражает текущее состояние объекта и может моделировать его поведение. К функциям цифровых двойников можно отнести:

- мониторинг, который позволяет отслеживать состояние физического объекта в реальном времени;
- анализ, который обеспечивает возможность анализа данных для выявления проблем или оптимизации работы;
- симуляция, которая позволяет проводить симуляцию различных сценариев и предсказывать поведение системы при изменении условий.

Цифровые двойники находят применение в таких областях, как промышленность, транспорт, энергетика и здравоохранение. Они помогают в управлении жизненным циклом продуктов, улучшении процессов обслуживания и снижении затрат.

Цифровая модель служит основой для создания цифрового двойника. Она предоставляет структурированное представление о системе или объекте. Цифровой двойник использует данные из цифровой модели и дополнительно интегрирует данные из реального мира для создания более точной и актуальной реплики объекта.

В соответствии с Р 57700.37–2021, цифровые модели и цифровые двойники представляют собой важные инструменты для повышения эффективности управления и оптимизации процессов в различных отраслях. Они способствуют более глубокому пониманию систем и объектов, что в свою очередь позволяет принимать более обоснованные решения и улучшать качество продукции и услуг.

1.5 МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ИНЖЕКЦИОННОГО ЛИТЬЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САЕ-СИСТЕМ

В условиях промышленного эксперимента основная цель обычно заключается в извлечении максимального количества объективной информации о влиянии изучаемых факторов на производственный процесс с помощью наименьшего числа дорогостоящих наблюдений. Если в научных приложениях методы дисперсионного анализа используются для выяснения реальной природы взаимодействий, проявляющейся во взаимодействии факторов высших порядков, то в промышленности учет эффектов взаимодействия факторов часто считается излишним в ходе выявления существенно влияющих факторов [41].

Экспериментальные методы находят все большее применение в промышленности для оптимизации производственных процессов. Целью этих методов является поиск оптимальных уровней факторов, определяющих течение процесса производства. Обычно используемыми в промышленности: планами 2^{k-p} (двухуровневыми многофакторными планами), *отсеивающими планами* для большего числа факторов, планами 3^{k-p} (трехуровневыми многофакторными планами), смешанными 2-х и 3-х уровневыми планами, *центральными композиционными планами (или планами поверхности отклика)*, *планами на латинских квадратах*, *робастными планами Тагучи*, планами для *смесей*, а также специальными процедурами для проведения экспериментов на поверхностях с ограничениями (где k – количество учитываемых факторов, p – дробный фактор – количество смешанных эффектов, которые не учитываются). Интересно, что многие из этих методов прошли путь от заводских цехов до кабинетов менеджеров и аналитиков, зарекомендовав себя в задачах планирования прибыли в бизнесе, управления финансовыми потоками в банковском деле и многих других (см., например, работу Йокиама и Тагучи (1975)).

Обычно любая машина или станок, используемый на производстве, позволяет операторам изменять различные настройки, влияя на качество производимого продукта. Эксперименты позволяют инженеру, ответственному за производство, улучшать настройки машины, а также выяснить какие факторы

вносят наиболее важный вклад в качество продукции. Использование этой информации позволяет улучшить настройки системы, достигнув оптимального качества.

Можно выделить общий подход решения подобной задачи:

1. На первом этапе используют робастное планирование. Это план экспериментов, устойчивый к действию неуправляемых факторов, которые могут возникнуть на этапе производства или эксплуатации продукции. На этапе проектирования создаются сотни и тысячи маленьких прототипов физических и компьютерных, исследовательских систем с подбором режимных и конструктивных параметров объекта проектирования. Этот процесс осуществляется методом многофакторного эксперимента (МФЭ). При этом в лабораторные исследования или имитационные эксперименты включают все возможные факторы, которые возникают на этапе производства и эксплуатации изделий, которые трудно, невозможно или дорого исследовать в условиях производства и эксплуатации. Это наиболее рациональный, экономичный и обоснованный подход к оптимизации производства сложных изделий, при котором не возникает необходимости дополнительной корректировки создаваемых систем и технологий на этапе их промышленного производства. При таком подходе значительно сокращается срок разработки новых систем от момента идеи или построения до массового выпуска и выхода на рынок [42]. Метод Тагучи – один из способов уменьшить вариабельность процесса (позволяет определить значимые факторы). Принципы метода Тагучи описаны в разделе 1.5.1.

2. На втором этапе строят регрессионную зависимость оценки отклика от значимых факторов. Для этого используют регрессионный анализ, описанный в разделе 1.5.2.

3. На третьем этапе происходит поиск оптимальных значений факторов. Для решения этой задачи используют метод крутого восхождения, описанный в разделе 1.5.3.

1.5.1 МЕТОД ТАГУЧИ

Методы оптимизации проектирования продукции и производства были разработаны Гэнъити Тагучи – основатель робастного проектирования, успешно применившим эффективные прикладные статистические методы для повышения стабильности технологических процессов и увеличения их производственных возможностей. Он предложил проактивный подход к проектированию продукции и процессов, основанный на измерениях, анализе, прогнозировании и профилактике и направленный на встраивание качества в продукцию и процессы, а не на их контроль.

Определение оптимальных уровней контролируемых факторов для увеличения робастности и последующего улучшения показателей работы [43] включает следующие этапы:

1. Выбор параметров для проведения эксперимента. Проводится анализ системы с целью уменьшения влияния изменчивости процесса производства в ответ на возмущающие воздействия и выявления наиболее влияющих управляющих факторов.

Параметры должны представлять собой воспроизводимую величину, быть легко измеримы и являться прямым индикатором передачи информации в системе. Целевая функция (отношение «сигнал/шум») выбирается, исходя из типа характеристики качества. Определяются контролируемые факторы, их уровни и факторы шума. Робастность продукции достигается путем выбора (в ходе испытаний) условий, которые сглаживают действие различных факторов шума. Соотношение «сигнал/шум» должно быть определено таким образом, чтобы оно включало не только средний уровень отклика, но и наблюдаемую на этом уровне вариацию вследствие действия факторов шума. Один и тот же эксперимент может быть повторен несколько раз для получения различных откликов, соответствующих преднамеренно созданной вариации в факторах шума [44].

2. Выбор ортогональной матрицы для проведения эксперимента. Ортогональные матрицы позволяют производителю подбирать значения параметров при минимальном числе экспериментов. В столбцах ортогональной

матрицы представлены изучаемые факторы, а в рядах – уникальное сочетание уровней фактора данного эксперимента [44]. Если матрица ортогональна, то для любой пары столбцов все комбинации уровней фактора появляются одинаковое число раз, т.е. все факторы одинаково представлены во всех экспериментах. Для выбора подходящей ортогональной матрицы потребуется общее число степеней свободы.

Число степеней свободы – это совокупность значений параметра процесса, которые допускается варьировать для получения его заданного среднего значения.

В ортогональной матрице, необходимой для эксперимента, число рядов должно, как минимум, соответствовать сумме чисел степеней свободы всех факторов и общего среднего.

После выбора ортогональной матрицы проводятся эксперименты, для каждого из них вычисляется и записывается соотношение «сигнал/шум».

3. Анализ наблюдений, полученных в ходе эксперимента.

В ходе анализа средних (ANOM (analysis of means)) для всех экспериментов определяется общее среднее значение m . Это сбалансированный показатель, поскольку все уровни каждого из факторов одинаково представлены в общей совокупности экспериментов. Для каждого влияющего фактора отдельно вычисляется эффект m_i каждого его уровня. Эффект уровня фактора – это отклонение m_i от общего среднего значения m . Уровень фактора, оказывающий больший положительный эффект на среднее, признается оптимальным [44]. Таким образом, анализ средних используется для получения оптимальной комбинации всех воздействующих факторов.

Ортогональная структура эксперимента позволяет применять аддитивную модель для расчета отклика для любой отдельной комбинации факторов. Согласно аддитивной модели, совокупный эффект всех уровней фактора может быть получен путем суммирования отклонений, вызванных отдельными уровнями фактора, и общего среднего.

Согласно дисперсионному анализу (ANOVA), общая дисперсия показателя отношения «сигнал/шум» является суммой дисперсий каждого фактора и

дисперсии ошибки. ANOVA используется для расчета значимости каждого фактора. Для поддержания качества продукции наиболее значимые факторы должны строго контролироваться. Подробно суть дисперсионного анализа ANOVA разобрана в разделе 1.5.4.

4. Верификационный эксперимент. После выбора оптимальной комбинации различных факторов проводится верификационный эксперимент для сравнения расчетных и полученных в результате наблюдения откликов. Если они согласованы, то оптимальные значения принимаются, в противном случае аддитивная модель признается несостоятельной и должна быть изучена общая зависимость между факторами;

5. Дальнейшая оптимизация с помощью метода итераций. В экспериментах, проводимых по методам Тагучи, используются дискретные уровни факторов, что исключает возможность получить больше значений показателя отношения «сигнал/шум» на каком-либо промежуточном уровне между предварительно выбранными уровнями [45]. Чтобы компенсировать это, далее выполняется эксперимент с выбором новых уровней относительно оптимального уровня, определенного ранее. Если начальный диапазон значений уровней фактора максимально широк, то такие итерации могут существенно улучшить показатель отношения «сигнал/шум».

Проектирование допустимых отклонений. Данный этап служит для уменьшения уязвимости продукции к действию факторов, наиболее влияющих на нее, посредством применения улучшенных материалов и включения дополнительных элементов для контроля этих факторов [45].

1.5.2 РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ

Одним из способов для определения оптимальных параметров инжекционного литья среди проводимых экспериментов является регрессионный анализ. Регрессионный анализ (Regression Analysis) – модель статистического прогнозирования, которая описывает и оценивает отношение между данной переменной (называемой зависимой переменной/ dependent variable) и одной или

несколькими другими переменными (называемыми независимыми переменными/ independent variables).

Во входных данных анализа – одна зависимая переменная и несколько независимых переменных, которые могут влиять на зависимую. Все переменные должны быть измерены по интервальным или дихотомическим шкалам. В случае если в анализ необходимо включить порядковые переменные (например, степень согласия с рядом высказываний, измеренную по 5-балльной шкале), их необходимо предварительно оцифровать (с помощью статистического метода перекодировать в интервальные).

Коэффициенты влияния показывают, какие из независимых переменных влияют на зависимую переменную положительно, а какие отрицательно, а также какова степень этого влияния. В простой линейной регрессии коэффициент, больший 0, свидетельствует о положительном влиянии данной независимой переменной на зависимую, а коэффициент, меньший 0 – об отрицательной.

С помощью регрессионного уравнения можно моделировать разные комбинации независимых переменных и прогнозировать отклик, какое значение примет в этих случаях зависимая переменная.

Основным преимуществом данного метода является выявление факторов, способных наиболее сильно влиять на целевые показатели качества отливки. В итоге мы получаем возможность изменения тех параметров, которые способны улучшить ситуацию, и устранения тех, которые ухудшают целевой показатель.

1.5.3 МЕТОД КРУТОГО ВОСХОЖДЕНИЯ

Во многих случаях первоначальная оценка оптимальных рабочих условий для системы оказывается далека от действительного оптимума. В такой ситуации цель исследователя – перейти в окрестность оптимума, применяя при этом простую и экономически эффективную процедуру экспериментирования. Когда мы находимся далеко от оптимума, то обычно полагаем, что в небольшой области изменения переменных модель первого порядка адекватно аппроксимирует истинную поверхность.

Метод крутого восхождения – процедура последовательного перемещения по пути крутого восхождения, то есть в направлении наибольшего увеличения отклика. Если необходима минимизация, то тогда следует применять метод крутого спуска.

Достоинства метода крутого восхождения:

1) высокая помехозащищенность (помехоустойчивость) в смысле точности оценивания составляющих градиента: если в градиентных методах каждая составляющая a_i оценивается лишь по двум точкам факторного пространства, то в ПФЭ, который в методе крутого восхождения используется для этой цели, каждый коэффициент оценивается по всем $N = 2^n$ точкам;

2) высокая эффективность в смысле скорости движения к экстремуму; по сравнению с методом Гаусса-Зайделя она выше за счет движения по градиенту, а по сравнению с градиентными – за счет исключения пробных опытов на каждом рабочем шаге и за счет виртуальных опытов;

3) пробные опыты, выполняемые методом ПФЭ, позволяют получать информацию об оценках a_{i1} коэффициентов при взаимодействиях факторов $z_i \cdot z_1$, характеризующих кривизну поверхностного отклика: увеличение a_{i1} при уменьшении a_i обычно характеризует приближение к экстремуму;

4) ПФЭ с применением параллельных опытов позволяет достаточно просто осуществлять надежную статистическую интерпретацию результатов;

5) метод наиболее эффективен из всех известных при пологих поверхностях отклика.

Недостаток рассмотренного метода – несколько большая, чем в предыдущих методах, сложность планирования пробных опытов, требующая одновременного варьирования сразу всех факторов относительно базовой точки, и меньшая оперативность по сравнению с симплексным методом в условиях дрейфующих объектов.

1.5.4 ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ ANOVA

Целью дисперсионного анализа (ANOVA – Analysis of Variance) [46, 47] является проверка значимости различия между средними группами в разных группах с помощью сравнения дисперсий этих групп. Разделение общей дисперсии на несколько источников (связанных с различными эффектами в плане), позволяет сравнить дисперсию, вызванную различием между группами, с дисперсией, вызванной внутригрупповой изменчивостью.

Проверяемая гипотеза состоит в том, что различия между группами нет. При истинности нулевой гипотезы, оценка дисперсии, связанной с внутригрупповой изменчивостью, должна быть близкой к оценке межгрупповой дисперсии. При ее ложности – значимо отклоняться.

В целом дисперсионный анализ может быть разделён на несколько видов:

- одномерный (одна зависимая переменная) и многомерный (несколько зависимых переменных);
- однофакторный (одна группирующая переменная) и многофакторный (несколько группирующих переменных) с возможным взаимодействием между факторами;
- с простыми измерениями (зависимая переменная измеряется лишь один раз) и с повторными (зависимая переменная измеряется несколько раз).

Метод дисперсионного анализа базируется на предположении о том, что если на объект (группу испытуемых) влияет несколько независимых факторов и их влияние складывается, то общую дисперсию значений признака, характеризующую объект (группу испытуемых) можно разложить на сумму дисперсий, возникающих в результате воздействия каждого отдельного фактора, а также обусловленных случайными влияниями (остаточная дисперсия). Сравнение дисперсий, обусловленных влиянием различных факторов со случайной (остаточной) дисперсией позволяет оценить значимость вклада каждого из факторов, то есть оценить достоверность этих влияний.

Иногда дисперсионный анализ применяется, чтобы установить однородность нескольких совокупностей. А именно: если дисперсии этих совокупностей одинаковы (по предположению) и если математические ожидания одинаковы, то можно считать, что совокупности однородны. Однородные совокупности можно объединить в одну и тем самым упростить исследования и получить более полную информацию, более надёжные выводы.

1.6 ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ НА ПРАКТИКЕ

Поскольку литье пластмасс под давлением является сложным производственным процессом, а качество продукции зависит от выбора материалов, конструкции пресс-формы и параметров процесса, поиск оптимального набора параметров является ключевой задачей. Чтобы достичь оптимальных параметров процесса инжекционного литья для отдельных изделий, инженеры часто должны полагаться на свои общие наработки, чтобы применить метод проб и ошибок или они используют подход Тагучи, оба из которых требуют много времени, поскольку проводятся многочисленные эксперименты. Кроме того, метод Тагучи в существующей литературе требует использования отношения сигнал/шум (S/N) для поиска и калибровки оптимальных параметров процесса.

В частности, Wu CH и Chen WS [48] использовали ортогональную матрицу Taguchi L_9 (3^4) при литье под давлением для исследования оптимальных параметров процесса, где основными факторами были температура расплава, скорость впрыска, температура формы и давление подпрессовки. Teng и Xu [49] объединили метод Тагучи и методологию поверхности ответа. В заслуживающем внимания исследовании Aggarwal и другие [50] провели эксперименты по установке параметров процесса с использованием метода Тагучи, плана эксперимента и методологии поверхности отклика и в их постановке задачи обнаружили, что методология поверхности отклика имеет очевидные преимущества перед методом Тагучи. Аналогичным образом Курт и др. [51] использовали эксперименты с ортогональными матрицами Тагучи, значения отношения сигнал/шум, дисперсионный анализ (ANOVA) (пункт 1.5.3) и

регрессионные модели (пункт 1.5.1) для поиска оптимальных параметров. Altan M [52] провел эксперименты с использованием метода Тагучи и дисперсионного анализа, пытаясь уменьшить усадку при литье под давлением. Zhai M и Xie Y [53], используя программное обеспечение Moldflow и метод Тагучи при литье под давлением, провели эксперименты по оптимизации параметров литья под давлением. В соответствии с этим, Ng et al. [54] использовали метод Тагучи и ANOVA в своей попытке оптимизировать параметры литья под давлением. Кроме того, Öktem [55] использовал программное обеспечение Moldflow с экспериментами Тагучи и ANOVA для определения наиболее важных параметров процесса литья. В ходе дальнейшей разработки Ван и др. [56] использовали метод Тагучи для исследования взаимосвязей между параметрами процесса литья и коробления, где основными параметрами были температура расплава, время впрыска, давление паковки, время паковки и время охлаждения. Однако результаты таких экспериментов Тагучи выявили только дискретные комбинации, а не оптимальные параметры процесса. На практике было отмечено, что несоответствующие комбинации параметров процесса могут привести к дефектам продукта, явлению нестабильности процесса и так далее.

Shi et al. [57] применили программное обеспечение Moldflow для моделирования, в котором экспериментальные данные обрабатывались с использованием нейронной сети обратного распространения (BPNN) в сочетании с генетическими алгоритмами (GA). В их исследовании температура пресс-формы, температура расплава, время впрыска и давление впрыска были взяты в качестве контрольных факторов, в то время как максимальное напряжение сдвига было ключевой характеристикой качества. Инь и др. [58] также представили гибридный метод оптимизации, сочетающий BPNN и GA для оптимизации технологических параметров пластиковой крышки на основе анализа Moldflow. Озчелик и Эрзурумлу [59] применили программу Moldflow для проведения моделирования. Впоследствии Акбарзаде и Садеги [60] указали, что изменение размера из-за усадки во время процесса литья пластмасс под давлением является важной проблемой. Chen et al. [61] при оптимизации параметров процесса использовали план

эксперимента (DOE), методологию поверхности отклика (RSM) и GA. Однако при моделировании CAE не учитывались внутренние и внешние шумовые помехи регулирующих факторов, и фактическая ошибка впрыска все еще существовала.

Поэтому в многочисленных исследованиях использовались фактические эксперименты по литью под давлением для сбора данных и создания моделей многокритериальной оптимизации для процесса литья пластмасс под давлением. Chen et al. [62] построили систему оптимизации параметров, объединяющую анализ Moldflow, метод Тагучи, ANOVA, BPNN, GA и метод Дэвидона – Флетчера – Пауэлла (DFP). Куртаран и Эрзурумлу [63] интегрировали DOE, RSM и GA для получения оптимальных параметров коробления из тонкого пластика и использовали ANOVA для поиска более важных факторов, а также объединили RSM и GA для поиска оптимальных параметров процесса. Парк и Данг [64] объединили DOE и RSM вместе с ANOVA и численным моделированием для проведения экспериментов по оптимизации. Аналогичным образом Sun et al. [65] использовали программное обеспечение моделирования в сочетании с RSM и GA, чтобы найти оптимальные параметры литья под давлением. Следует отметить, что Zhao et al. [66] предложили модель быстрого анализа полосы в сочетании с оптимизацией потока частиц (PSO), которая эффективно сократила время охлаждения при том же давлении подпрессовки. Xu et al. [67] провели исследование многокритериальной оптимизации, интегрировав метод расчета параметров Тагучи и нейронные сети с многокритериальным алгоритмом PSO для определения оптимальных условий процесса.

1.7 МЕТОДЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Конструктору и технологу приходится принимать решения по выбору тех или иных технологических параметров в условиях неопределенности множества факторов воздействия на отливаемое изделие. Инструменты, которые могут помочь в выборе технологических параметров: серый реляционный анализ и функция желательности.

1.7.1 СЕРЫЙ РЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ (GREY RELATIONAL ANALYSIS OF QUALITY INDICATORS)

«Серым» управленческим анализом называют управленческий анализ в условиях неопределенности. Обычно таким анализом оценивают ситуацию, когда неопределенная информация составляет от 30% и более от общего объема информации. Термин «серые» обусловлен оппозиционной шкалой, на которой с одной стороны стоит термин «белые» (полная информационная определенность), на другой стороне стоит термин «черные» (полная информационная неопределенность). Отсюда термин «серая информационная ситуация» обозначает информационную ситуацию с частичной определенностью и частичной неопределенностью. Поэтому термин «серый управленческий анализ» применяют при частичной определенности управленческой информации. Термин «серый анализ» применяют в реляционном [68, 69] анализе. Серый реляционный анализ [69] использует информационный подход [70, 71] и модель информационной ситуации [72].

Теория серых систем была предложена профессором Deng [73] для исследования систем с недостаточным содержанием информации. Серой называется такая система, которая частично известна и частично неизвестна (с неполным описанием) [73, 74]. В теории серых систем серый реляционный анализ улавливает отношения между главным фактором и другими вспомогательными факторами в исследуемой системе. В процессе сравнения эталонная последовательность соотносится со сравниваемыми последовательностями, которые показывают некоторую степень сходства с эталонной моделью и, таким образом, определяется лучшая из них.

Grey relational анализ – метод измерения в теории серой (grey) системы, который анализирует степень (degree) и уровень отношения разнородных параметров для их дискретной последовательности.

Исходные экспериментальные данные сначала нормировались в диапазоне от 0 до 1 в соответствии с принципом «меньше – лучше» для величины корабления по зависимости (1.1):

$$x_{ij} = \frac{y_{ij} - \min_j y_{ij}}{\max_j y_{ij} - \min_j y_{ij}}, \quad (1.1)$$

где $y_{ij} = \max_n y_{ij}^n$ – наиболее негативная характеристика качества (максимальные значения по каждому параметру) среди $n=1\dots 12$ рассматриваемых параметров инъекционного литья. Наилучший нормированный результат соответствует значению 1.

Grey relational коэффициент ξ_{ij} , который рассчитывается, для определения соотношения между идеальным и фактическим экспериментальными результатами может быть выражен как:

$$\xi_{ij} = \frac{\min_i \min_j |x_i^0 - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|}{|x_i^0 - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|}, \quad (1.2)$$

где x_i^0 – это идеальный результат (т.е. лучший нормализованный результат =1) для i - характеристики качества, $\zeta = [0,1]$ – (distinguishing) коэффициент отличия, целью которого является ослабление эффекта $\max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|$, когда он становится слишком большим и, следовательно, увеличивает разницу значимости grey relational коэффициента. В общем, его значение принимается равным 0,5, если все параметры процесса имеют равный вес.

После получения grey relational коэффициентов ξ_{ij} далее используется метод весовых коэффициентов для интеграции полученных значений grey relational коэффициентов для каждого эксперимента в интегрированную реляционную оценку. Общая оценка множественных характеристик качества основана на интегрированной реляционной оценке, которая определяется по зависимости (1.3):

$$\gamma_j = \sum_{i=1}^m \frac{l_i}{\sum_{i=1}^m l_i} \xi_{ij}, \quad (1.3)$$

где l_i - уровень значимости i -ой характеристики качества.

Чем выше интегрированная реляционная оценка, тем лучше результат эксперимента, тем он ближе к идеально нормированному значению.

1.7.2 ФУНКЦИЯ ЖЕЛАТЕЛЬНОСТИ

Для решения многокритериальных задач (каковой является оптимизация процесса инъекционного литья) используются различные методы построения обобщенного показателя, причем одним из наиболее удобных способов выступает обобщенная функция желательности Е. К. Харрингтона. Она возникла в результате наблюдений за реальными решениями экспериментаторов и обладает такими полезными свойствами, как непрерывность, монотонность и гладкость [75].

Предлагаемая методика сравнения различных автоматизированных средств (АС) – на основе оценок их технических характеристик по обобщенной функции желательности Харрингтона – представляет некоторые способы универсализации общего подхода к проблеме оценки эффективности существующих и вновь разрабатываемых АС самого различного направления, а также исследует возможность оптимизации как самих методов сравнения, так и процесса разработки новых АС. Вместо простого сравнения параметры систем пересчитываются в числовые значения, а затем обрабатываются для получения общего коэффициента системы.

По этим коэффициентам различные системы сравниваются, так сказать, «в чистом виде».

Математический аппарат пересчета конкретных параметров в абстрактные числовые значения крайне прост. За основу берется одна из логистических функций Е. К. Харрингтона – так называемая «кривая желательности». Ее формула – $d = \exp[-\exp(-Y)]$ – определяет функцию с двумя участками насыщения (в $d \rightarrow 0$ и $d \rightarrow 1$) и линейным участком (от $d=0,2$ до $d=0,63$).

Эта функция была выведена эмпирическим путем. Ось координат Y называется шкалой частных показателей. Ось d – шкалой желательности. Промежуток эффективных значений на шкале частных показателей – $[-2; +5]$.

Шкала желательности делится в диапазоне от 0 до 1 на пять поддиапазонов: $[0; 0,2]$ – «очень плохо», $[0,2; 0,37]$ – «плохо», $[0,37; 0,63]$ – «удовлетворительно», $[0,63; 0,8]$ – «хорошо», $[0,8; 1]$ – «очень хорошо». Конкретные параметры сравниваемых систем распределяются в масштабе, соответствующем

предъявляемым к ним требованиям, на промежутке эффективных значений шкалы частных показателей. Затем соответствующие им показатели пересчитываются в отметки на шкале желательности. Полученное значение $d(i)$ для i -го параметра пересчитывается вместе с другими в обобщенный коэффициент желательности – D . Он вычисляется по формуле $D = \sqrt[n]{d(1) \cdot d(2) \cdot \dots \cdot d(n)}$, где n – число используемых показателей параметров сравнения для данной системы. Причем число этих показателей может быть неодинаковым для разных систем. Это позволяет сравнивать обобщенные коэффициенты даже тогда, когда отсутствует часть параметров сравнения у различных систем или данные по ним. Корень n -й степени «сглаживает» возникающие отклонения, а полученный результат позволяет оценивать системы (с определенной степенью точности) «математически».

1.8 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

На основании литературного обзора современного состояния вопроса оценки качества литых изделий из полимерных материалов на этапе конструкторско-технологической подготовки производства можно сделать следующие выводы:

1. Показатели качества литых изделий обеспечиваются в едином цикле на этапе проектирования изделия, а именно: выбор метода технологии изготовления, выбор материала, проектирование и изготовление оснащения. Наиболее дорогостоящим компонентом на этапе конструкторско-технологической подготовки является оснащение, поэтому актуальной задачей становится диагностика появления потенциальных отклонений от показателей качества.

2. Отклонения, которые выходят за рамки технических требований к продукции, приводят к появлению многочисленных дефектов, значительную часть которых можно определить с использованием цифровых двойников и CAE-анализа. Границы этих отклонений зависят от вида и рода продукции и ее функционального предназначения.

3. Для качественного анализа CAE-системы должны обеспечивать имитационное моделирование процесса литья, учитывая особенности

оборудования (возможность контроля скорости впрыска, регулирование давления впрыска, конструкцию пресс-формы, обеспечивающая подвод расплава, температуру расплава и так далее).

4. Результаты таких имитационных моделей позволяют получить распределенную по объему картину (картину заполнения формообразующей оснастки, локальных короблений и т. д.), но не дают количественную характеристику в принятии решения о приоритете тех или иных режимов и конструкций пресс-формы для обеспечения качественных параметров. Таким образом, требуется квалиметрическая интегральная оценка этих параметров для принятия решений.

5. CAE-системы позволяют провести виртуальный эксперимент для определения области рациональных технологических параметров. Общий алгоритм для обработки результатов экспериментов будет аналогичен методам робастного планирования экспериментального эксперимента с учетом особенностей применения CAE-систем.

6. Не разработана единая документация для процедуры применения инженерного анализа с использованием «цифровых двойников» процесса и их интеграции в систему технологической подготовки производства.

Учитывая вышеизложенное, целью диссертационной работы является повышение качества изделий из полимерных материалов, получаемых литьем под давлением за счет совершенствования инструментария подготовки производства, включающего этап цифрового моделирования процесса литья и мониторинга показателей качества отливок на цифровых моделях, полученных на основе анализа потребительских требований к изделиям.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести теоретический анализ существующих подходов к обеспечению качества изделий, изготовленных методом инжекционного литья.

2. Разработать методом QFD ранжированную матрицу соответствия потребительских показателей качества изделий и характеристик процесса

формообразования при имитационном моделировании инъекционного литья на примере изделий крышка тары и шестерня.

3. Разработать методику прогноза качества деталей по результатам квалиметрической оценки характеристик процесса формообразования при имитационном моделировании инъекционного литья, определение характеристик качества формообразования на примере изделий крышка тары и шестерня.

4. Разработать методику управления качеством инъекционного литья с использованием планирования эксперимента и средств имитационного моделирования путем анализа характеристик качества процесса формообразования при инъекционном литье за счет выбора технологических параметров литья и рациональной конструкции пресс-формы (система подвод расплава и система охлаждения) на примере изделий крышка тары и шестерня.

5. Разработать регламент подготовки производства, включающий этап цифрового моделирования процесса литья и мониторинг качества отливок на цифровых имитационных моделях, обеспечивающий получение высокоточных полимерных деталей.

2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ОТЛИВОК НА ЭТАПЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Анализ процессов конструкторско-технологической подготовки производства показал их итерационный характер. В основе разработки метода производства полимерных литых изделий лежит основное требование – обеспечить выпуск продукции, соответствующей заданным требованиям. Поэтому каждый из последующих этапов процесса находится в тесной итерационной связи с предыдущими и перспективной связи с последующими этапами. Вся информация, которая формируется в процессе конструкторско-технологической подготовки, используется для формирования базы знаний, которая может быть применена при проектировании и изготовлении литых изделий из полимерных материалов. При этом система внутренних связей между различными специалистами и этапами проектирования позволяет не только диагностировать возникающие проблемы (такие, как снижение качества изделия или появление дефектов), но и точно определить необходимые изменения и на каком этапе их нужно внести, а также какие последующие корректировки потребуются в связи с изменениями. Информационное моделирование на основе управляемой системы взаимосвязанных компьютерных моделей более подробно рассмотрено в работе [8].

Для обеспечения качества изделий необходим комплексный подход [76], то есть создание полной технологической цепочки проектирования и подготовки производства изделий, начиная от разработки конструкции изделия, ее оптимизации, проверки изделия на технологичность и заканчивая производством, эксплуатацией и утилизацией изделия.

2.1 СУЩЕСТВУЮЩАЯ ПРАКТИКА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Современная практика управления качеством конструкторско-технологической подготовки производства литых изделий из полимерных материалов характеризуется существенными недостатками, которые начинаются уже на этапе проектирования. Согласно исследованию, Association of German Engineers (VDI 2221, 2023), более 60% конструкторов не обладают достаточными знаниями о технологии инъекционного литья, что приводит к созданию конструкций, технологически сложных или даже невозможных для производства. Это проявляется в неоптимальных толщинах стенок, вызывающих дефекты усадки и коробления, отсутствии необходимых радиусов скругления, в связи с чем снижается прочность на 25 – 40% [77], а также в игнорировании направления смыкания формы, что увеличивает стоимость оснастки на 30 – 50%.

Переходя к технологической подготовке, ситуация остается сложной. Практика проектирования литьевых форм, согласно отчету, International Mold Manufacturers Association (IMMA, 2022), характеризуется упрощенным подходом к системе литников – 72% проектировщиков используют типовые решения без адаптации к конкретному материалу и изделию. Только 28% предприятий проводят полный анализ течения расплава для сложных изделий, а эмпирический расчет систем охлаждения приводит к неоднородности температурных полей и увеличению времени цикла на 15 – 25%. Выбор материала в 45% случаев осуществляется на основе прошлого опыта, а не по результатам расчетов и испытаний, как показало исследование Plastics Technology Center (2022).

Система управления качеством на этапе подготовки также имеет существенные недостатки. Анализ American Society for Quality (2022) демонстрирует, что только 40% предприятий применяют FMEA на этапе конструкторско-технологической подготовки, причем в 65% случаев анализ проводится формально, без последующего внедрения корректирующих действий. Исследование McKinsey Digital (2023) выявило, что разрыв между CAD/CAM

системами и производственными данными существует на 78% предприятий, что приводит к потере информации при передаче данных между отделами и невозможности использования производственных данных для улучшения проектирования.

На сегодняшний день практика управления качеством конструкторско-технологической подготовки производства литых изделий представлена на схеме (рисунок 2.1) и состоит из следующих этапов:

1. На первом этапе происходит разработка конструкции опытной одногнездовой пресс-формы, далее утверждается проект и изготавливается опытная пресс-форма. Параллельно проходит процесс назначения технологических режимов инъекционного литья. Этап выполняется сотрудниками производства на основании нормативных документов, личного опыта, расчетных схем и типовых технологических процессов. Завершением первого этапа является натурный эксперимент и получение опытной отливки, а также анализ качества полученной отливки. Анализ качества происходит с применением показателей качества, определяемых на основе опыта работы предприятия. В случае несоответствия значений показателей качества требуемому уровню, возвращаются к первому этапу, на котором проводят доработку пресс-формы. Этот цикл может повторяться несколько раз (до момента получения годной партии отливок). В результате утверждается конструкция опытной пресс-формы, которая служит прототипом для проектирования и изготовления серийной многогнездовой пресс-формы.

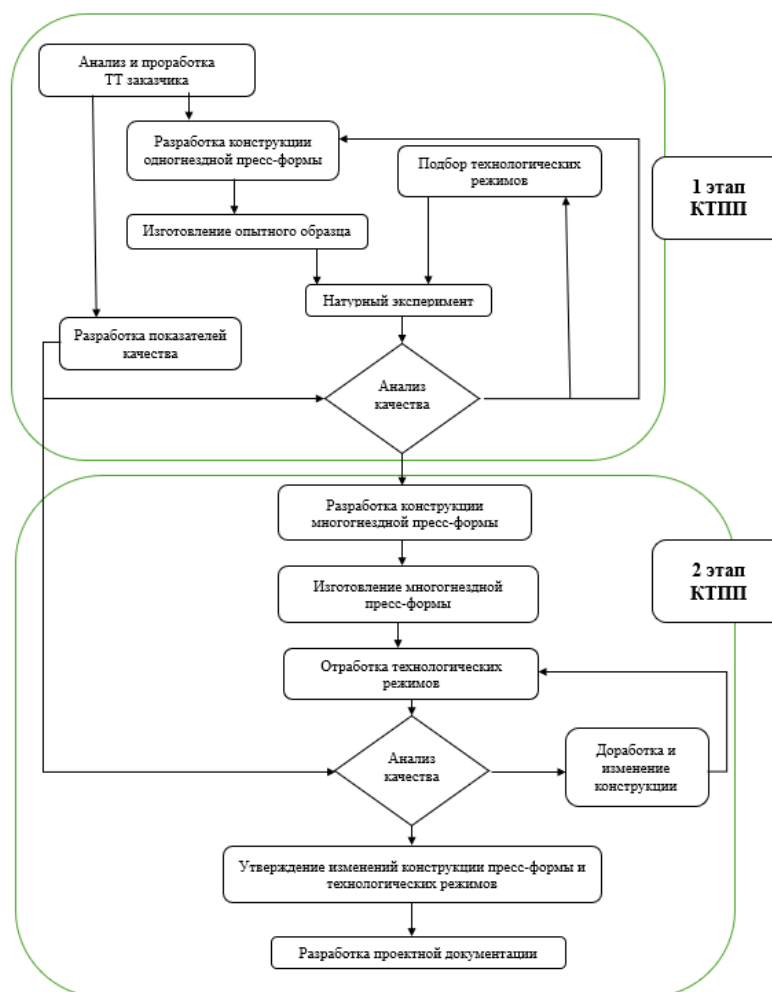


Рисунок 2.1 – Существующая методика технологической подготовки производства изделий из полимерных материалов

2. На втором этапе происходит разработка конструкции многогнездной пресс-формы на основе полученных результатов при разработке и испытаниях одногнездной пресс-формы. После изготовления серийной пресс-формы производится отработка технологических режимов литья. Завершается данный этап оценкой качества полученных отливок на основе параметров качества, используемых на втором этапе. Следует отметить, что условия работы одногнездной пресс-форма отличаются от условий работы многогнездной пресс-формы ввиду особенностей присущих только конкретной конструкции. Иными будут такие характеристики процесса, как проливаемость, температурные режимы охлаждения, устройство системы автоматизации извлечения отливки и т.д. Поэтому возможна доработка многогнездной пресс-формы в несколько итераций, и, как

следствие, увеличение трудовых и временных затрат. Это является существенным недостатком существующей практики подготовки производства.

Завершающим этапом является утверждение проектной конструкторско-технологической документации, обеспечивающей процесс получения годных отливок.

2.2 АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОКАЗЫВАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ НА КАЧЕСТВО ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВОК ИЗ ПКМ МЕТОДОМ ИНЖЕКЦИОННОГО ЛИТЬЯ

Согласно определениям, под качеством следует понимать степень соответствия совокупности характеристик объекта требованиям [78]. Также стандарт [79] содержит следующую информацию о качестве: Организация, ориентированная на качество, поощряет культуру, отражающуюся в поведении, отношении, действиях и процессах, которые создают ценность посредством выполнения потребностей и ожиданий потребителей и других соответствующих заинтересованных сторон. Качество продукции и услуг организации определяется способностью удовлетворять потребителей и преднамеренным или непреднамеренным влиянием на соответствующие заинтересованные стороны. Качество продукции и услуг включает не только выполнение функций в соответствии с назначением и их характеристики, но также воспринимаемую ценность и выгоду для потребителя [78].

Технологическая сложность процесса инжекционного литья, где более 50 взаимозависимых параметров непосредственно влияют на качество продукции, требует системного подхода к управлению. Исследование Fraunhofer Institute (2023) демонстрирует, что традиционный эмпирический подход обеспечивает стабильное качество только в 35% случаев, тогда как использование функционального моделирования позволяет выявлять скрытые взаимосвязи между параметрами процесса, стандартизировать оптимальные режимы для различных материалов и создавать математические модели для прогнозирования результатов. Это особенно актуально в условиях перехода к Industry 4.0, где функциональная

модель служит основой для создания цифровых двойников процессов, обеспечивающих виртуальную оптимизацию параметров литья и предиктивное управление качеством (Plastics Technology Center, 2022).

Функциональная модель процесса изготовления отливок методом инжекционного литья из ПКМ представлена на рисунке 2.2.

На первоначальном этапе при получении заявки и соответствующих входных данных (чертеж) необходимо провести анкетирование заказчика для определения технических требований к продукции и последующей идентификации необходимых параметров для отслеживания качества продукции. Выходным параметром является анкета для определения характеристик продукции и предъявляемых требований к качеству продукции. Анкетирование заказчика является важным этапом и необходимо для согласования технических требований к заготовке и технологическому процессу, а также определения контролируемых показателей качества в зависимости от назначения изделия в эксплуатации.

Следующим этапом является конструкторско-технологическая подготовка производства (КТПП). В качестве элементов управления выступают правила: стандарты качества, конструкторская документация, в качестве механизмов – персонал и программное обеспечение (ПО).

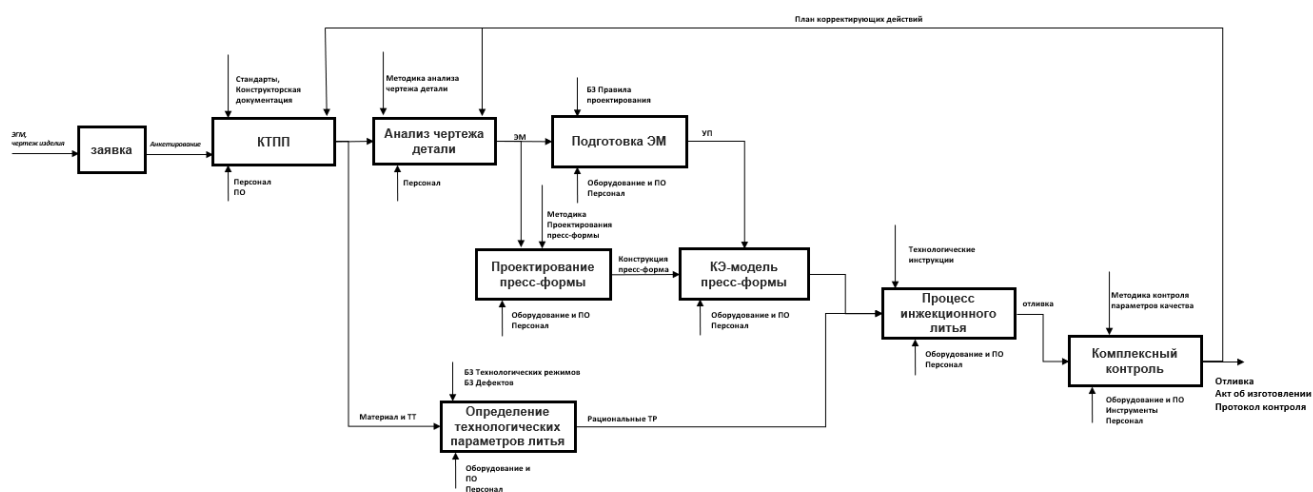


Рисунок 2.2 – Функциональная модель процесса изготовления отливок методом инжекционного литья из ПКМ

Процесс начинается с анализа чертежа детали, где выполняется детальное изучение технических требований и согласование ключевых характеристик изделия. Этот этап формирует основу для всех последующих работ, задавая чёткие критерии для проектирования оснастки и технологии.

Далее следует этап подготовки электронной модели (ЭМ) и проектирования пресс-формы. Здесь на основе утверждённых требований создаётся цифровой прототип изделия, проектируется оснастка, обсуждается и утверждается её концепция. После этого создаётся конечно-элементная (КЭ) модель пресс-формы, где осуществляется детальная проработка и виртуальная валидация оснастки. Моделируются рабочие переходы, конструкция литниковой системы, охлаждение и другие эксплуатационные аспекты, что позволит в дальнейшем получить параметры оптимизации конструкции пресс-форму ещё до её изготовления.

На основе готовой цифровой модели оснастки переходят к проектированию самого процесса инъекционного литья. Этот этап включает планирование технологической последовательности операций, организацию комплексного контроля при отладке и согласование переходов между стадиями настройки. Таким образом, формируется утверждённый технологический регламент, связывающий конструкцию формы с условиями её работы на литьевой машине.

Основная задача состоит в использовании методов, которые устанавливают функциональные связи между явлениями, перевод качественных характеристик качества в количественные (измеряемые), так как только при наличии измеряемых параметров можно корректировать процесс и повышать качество изготавливаемых изделий. Однако, выбор набора ключевых характеристик зависит от объекта изготовления. Основные требования к геометрическим параметрам, химическому составу и механическим свойствам изделия устанавливают в зависимости от назначения изделия в эксплуатации (таблица 2.1). Для каждой группы изделий определяется необходимое и достаточное количество показателей качества.

Таблица 2.1 – Основные требования к изделию

| Группа изделий | Назначение | Характеристика | Требования к изделию |
|----------------|-----------------------------------|---|---|
| 1 | Изделие общего назначения | Изделия, конфигурация и размеры которых определяются только конструктивными и технологическими требованиями | геометрическая точность |
| 2 | Изделия ответственного назначения | Изделия, рассчитываемые на прочность и работающие при циклических и динамических нагрузках | геометрическая точность; механические свойства; физические свойства; шероховатость; эксплуатационные свойства |

Предложенный подход решает задачи общего случая, но не учитывает специфические требования заказчиков к продукции, которые могут быть уникальными и включать дополнительные параметры.

В связи с этим возникает задача классификации изделий для управления качеством, а также выбора ключевых характеристик, которые позволят оценить качество получаемого изделия. Цель такой классификации – выявить и ранжировать взаимосвязи между запросами потребителей и технологическими настройками процесса литья.

Для решения этой задачи эффективно применяется метод QFD (развертывание функции качества). Данный метод последовательно преобразует пожелания клиентов: сначала в технические характеристики продукта, затем – в параметры производственного процесса и, наконец, – в конкретные требования к оборудованию и системам контроля.

Основным инструментом QFD-метода является так называемый «Дом качества» [80], который визуализирует эти взаимосвязи.

Ключевые показатели качества определяют минимально необходимые функциональные свойства изделия и уровень удовлетворенности заказчика. Таким образом, приведенный перечень показателей не является жестким: он может быть

расширен за счет новых характеристик или сокращен в соответствии с пожеланиями заказчика и условиями эксплуатации готовой продукции.

На рисунке 2.3 представлен «Дом качества», которые показывает связь между требованиями к продукции и требованиями к характеристикам процесса.

| Row # | Max Relationship Value in Row | Relative Weight | Weight / Importance | Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows") | температура расплава | Давление впрыска | Скорость впрыска | Температура формы | Время выдержки | Усадка материала после литья | Свойства материала... | Сложность конструкции формы | дальнее подпрессовки | время охлаждения | Конструкция системы охлаждения пресс-формы | Толщина стенки | число впрысков | Количество гнезд в пресс-форме |
|--|-------------------------------|-----------------|---------------------|--|----------------------|------------------|------------------|-------------------|----------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------|------------------|--|----------------|----------------|--------------------------------|
| Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats") | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 9 | 12,0 | 10,0 | Прецизионная геометрия отдельных элементов | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 2 | 9 | 10,8 | 9,0 | Качество поверхности отливки | ▲ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 3 | 9 | 10,8 | 9,0 | Отсутствие локальных короблений | ○ | ○ | ▲ | ○ | ▲ | ▲ | ○ | ▲ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ▲ |
| 4 | 9 | 9,6 | 8,0 | Стабильность размеров в эксплуатации | ○ | ○ | ○ | ▲ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 5 | 9 | 8,4 | 7,0 | Механические свойства | ○ | ○ | ▲ | ○ | ○ | ○ | ○ | ▲ | ○ | ○ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ |
| 6 | 9 | 7,2 | 6,0 | Коррозионная и химическая стойкость | ○ | ▲ | ▲ | ○ | ○ | ▲ | ○ | ▲ | ▲ | ○ | ○ | ▲ | ▲ | ▲ |
| 7 | 9 | 9,6 | 8,0 | Себестоимости отливки | ○ | ▲ | ▲ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ▲ | ○ |
| 8 | 9 | 9,6 | 8,0 | Себестоимость пресс-формы | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ○ | ▲ | ▲ | ○ | ▲ | ○ | ○ |
| 9 | 9 | 10,8 | 9,0 | Обеспечение точности геометрии | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 10 | 9 | 10,8 | 9,0 | Требования к следу размеров на отливке | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ▲ | ▲ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Target or Limit Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Max Relationship Value in Column | | | | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 3 | 3 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| Weight / Importance | | | | 381,9 | 507,2 | 475,9 | 398,8 | 316,9 | 396,4 | 454,2 | 565,1 | 225,3 | 242,2 | 341,0 | 268,7 | 379,5 | 492,8 | |
| Relative Weight | | | | 7,0 | 9,3 | 8,7 | 7,3 | 5,8 | 7,3 | 8,3 | 10,4 | 4,1 | 4,4 | 6,3 | 4,9 | 7,0 | 9,0 | |

Рисунок 2.3 – Дом качества, устанавливающий связь между характеристиками продукции и требованиями к характеристикам процесса

Посредством матрицы связей исследуется взаимосвязь между техническими характеристиками (параметрами) продукции и технологическими параметрами процесса.

2.3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Основная задача, решаемая при построении интегрированного процесса разработки и производства литых изделий из полимерных материалов, заключается в создании методики конструкторско-технологической подготовки производства

литых изделий, выполнение которой позволяет произвести конечное изделие требуемого качества за минимальное количество итераций.

Разработанная схема интегрированного процесса представлена на рисунке 2.4 [81]. Интегрированный процесс охватывает несколько этапов жизненного цикла изделий – виртуальное моделирование, технологическая подготовка производства, производство и контроль. Принципиальное значение имеет наличие этапа компьютерного моделирования процесса формообразования, который носит ключевое значение по уменьшению количества итераций.

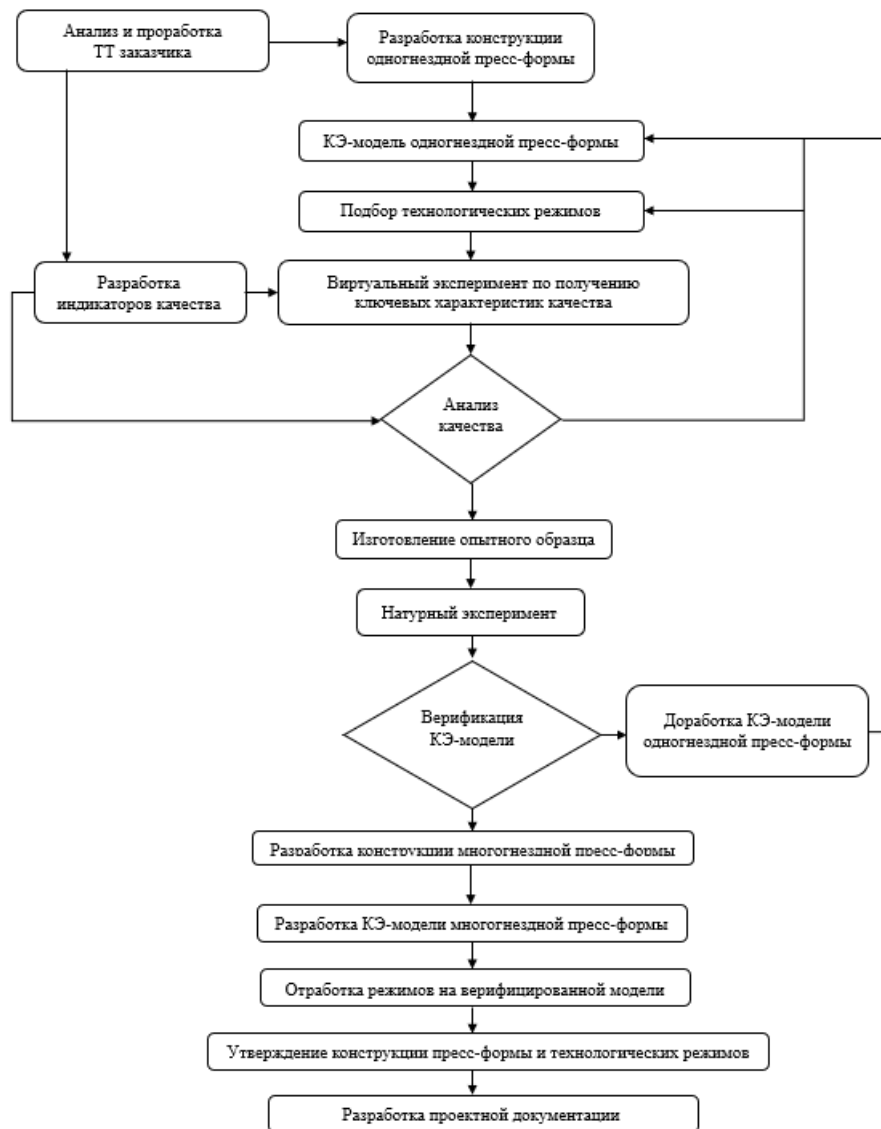


Рисунок 2.4 – Модернизированная методика технологической подготовки производства изделий из полимерных материалов

Основная область использования методики конструкторско-технологической подготовки производства литых изделий – мелкосерийное производство, реализуемое на предприятиях и в научно-образовательных учреждениях для изучения описываемых процессов и для проведения научно-исследовательских работ. Поскольку процесс ТПП универсален, то может быть применен и в рамках крупносерийного производства.

Схема интегрированного процесса конструкторско-технологической подготовки производства литых изделий состоит из следующих этапов:

1. Для облегчения и удешевления процесса конструкторско-технологической подготовки процесса литья разработка начинается с одногнездовой пресс-формы. На этом этапе предлагается создать конечно-элементную модель одногнездовой пресс-формы, для этого выполняют анализ конструкции изделия, возможной конструкции пресс-формы и системы охлаждения, анализ возникновения возможных дефектов и путей их устранения. Процесс создание КЭ-модели включает:

1.1. подготовку 3D-модели изделия и литниковой системы к проведению расчетов включает в себя создание адекватной сетки для проведения анализа в САЕ-системе Moldex3D, позволяющей обеспечить достоверность получаемых результатов;

1.2. определение возможности изготовить изделие, исходя из используемого материала, выбранной конструкции литниковой системы, особенностей геометрии изделия;

1.3. проводится предварительный расчет стадии заполнения, включающий оценку оптимальной скорости впрыска, оценку диапазона варьирования скорости впрыска и оценку максимального распорного усилия при заполнении;

1.4. проводится предварительный расчет стадий уплотнения и охлаждения отливки в форме, состоящий из оценки максимального распорного усилия при уплотнении, анализа влияния и изменения давления выдержки на процесс уплотнения; выявления оптимального времени выдержки под давлением и времени выдержки на охлаждение; оценки неравномерности уплотнения материала и

целесообразности использования профиля давления выдержки. Определение окна переработки (диапазона варьирования параметров процесса) с учетом возможных дефектов.

2. Подбор технологических режимов процесса литья. На этом этапе необходимо разработать план эксперимента.

2.1. разработка плана основного эксперимента по методу Тагучи.

2.2. разработка критериев оценки качества литых изделий на основе анализа требований, предъявляемых к изделию, и с учетом возникновения дефектов и их влияния на качество изделия.

3. Основная расчетная часть (Moldex3D) и анализ показателей качества.

3.1. Расчеты в соответствии с планом эксперимента: заполнение, уплотнение, коробление и т.д.

3.2. Определение значений «сигнал/шум» и выявление основных факторов режимов литья, влияющих на качество получаемого изделия.

3.3. Выявление взаимосвязей между основными показателями, такими, как усадка и коробление.

3.4. Определение оптимальных технологических режимов литья.

При необходимости на этом этапе происходит доработка КЭ-модели пресс-формы, а также могут быть внесены изменения в технологические режимы. После внесения изменений этапы 1-3 повторяются. После утверждения КЭ-модели одногнездной пресс-формы и выбора оптимальных технологических параметров можно переходить к 4 этапу.

4. Изготовление опытного образца и проведение натурального эксперимента. После проведения натурального эксперимента выполняется анализ качества литого изделия, а также верификация КЭ-модели процесса инжекционного литья в одногнездную пресс-форму (рисунок 2.5). При этом может потребоваться доработка КЭ-модели одногнездной формы, а также доработка конструкции пресс-формы.

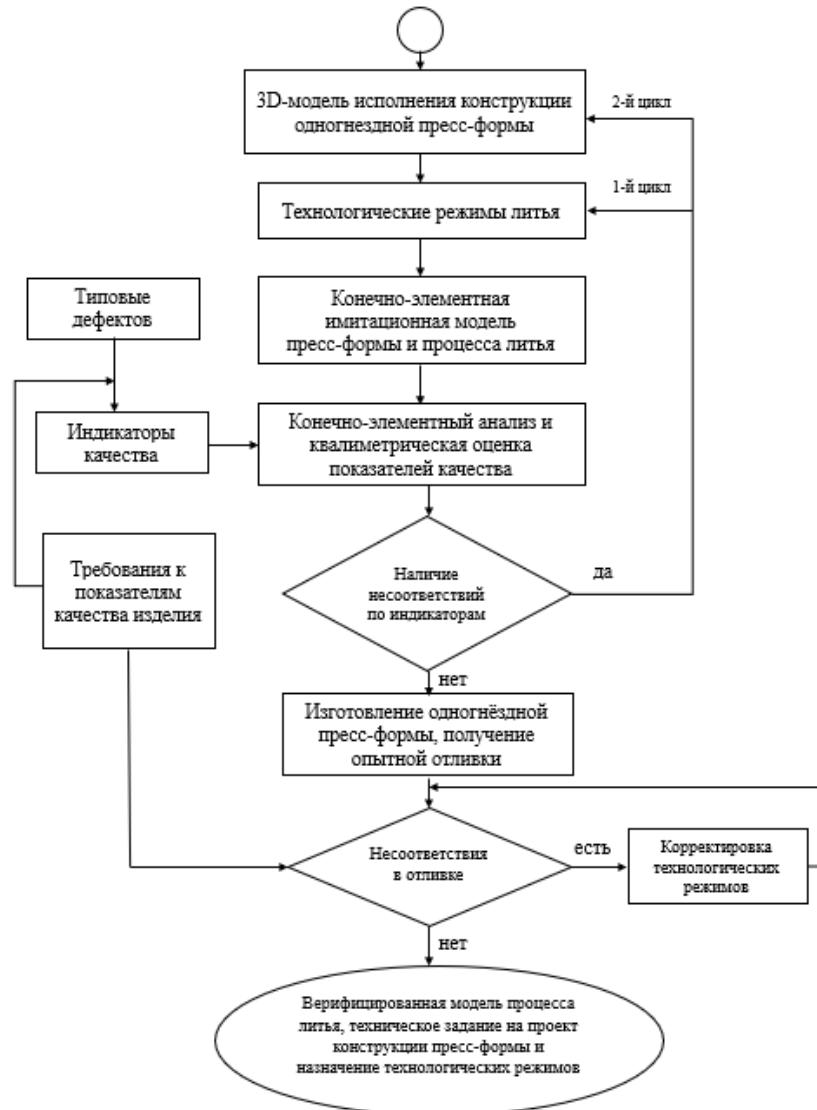


Рисунок 2.5 – К методике получения характеристик качества изделий по цифровой модели процесса инжекционного литья (схема верификации разработанной КЭ-модели пресса формообразования)

5. После верификации КЭ-модели одногнездной пресс-формы можно переходить к разработке многогнездной пресс-формы и созданию ее КЭ-модели. На полученной КЭ-модели многогнездной пресс-формы происходит отработка оптимальных технологических режимов и конструкции этой пресс-формы.

6. Последним этапом конструкторско-технологической подготовки является утверждение конструкции многогнездной пресс-формы и технологических режимов литья, а также подготовка проектной документации.

2.4. ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ 2

Проведён критический анализ существующей практики управления качеством на этапе конструкторско-технологической подготовки производства (КТПП) литых изделий из полимерных материалов. Установлено, что традиционный подход характеризуется следующими недостатками. Процесс подготовки включает последовательные этапы разработки одногнездной и многогнездной пресс-форм, каждый из которых сопровождается физическими испытаниями и доработками. Это приводит к значительным временным и финансовым затратам. Несмотря на наличие CAE-систем, их применение носит точечный характер и не интегрировано в единый регламент подготовки производства. Результаты моделирования представляются в виде распределённых полей параметров, представленных в графическом виде, что затрудняет принятие обоснованных решений о выборе оптимальных технологических режимов и конструктивных решений. Введение квалиметрической оценки позволило бы решить данную проблему.

На основе проведённого анализа разработана и предложена принципиально новая интегрированная методика КТПП, ключевыми особенностями которой являются:

- внедрение этапа сквозного цифрового моделирования: виртуальная отработка технологических параметров и конструкции пресс-формы на основе «цифровых двойников» процесса литья, что позволяет сократить количество итераций физических экспериментов;
- использование методов статистического планирования эксперимента (Тагути) для определения области рациональных параметров литья.
- разработка квалиметрических показателей качества отливок для перевода результатов CAE-анализа в интегральные количественные оценки качества;
- создание регламента, обеспечивающего последовательную и согласованную работу всех участников процесса – от анализа требований заказчика (QFD) до верификации цифровой модели и выпуска рабочей документации.

3 АДАПТАЦИЯ МЕТОДИКИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ОТЛИВОК НА ЭТАПЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРИ ИНЖЕКЦИОННОМ ЛИТЬЕ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Процесс подготовки производства средств технологического оснащения для инжекционного литья достаточно трудоемок и требует существенных временных затрат, которые могут не только повлиять на коммерческую успешность новых продуктов, но и поставить под сомнение целесообразность выпуска изделия как такового. Для определения управляемых параметров процесса формообразования был использован QFD-метод. Был построен дом качества (рисунок 3.1), который позволил преобразовать технические параметры заказчика в технологические параметры процесса и требования к конструкции пресс-формы.

| Row # | Max Relationship Value in Row | Relative Weight | Weight / Importance | Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats") | Column # | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------|-----------------|---------------------|--|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|---|---|---|---|---|---|---|--|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | | | | | | | |
| | | | | | Direction of Improvement: Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (⊖) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows") | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 9 | 17,2 | 10,0 | Точность геометрии | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | | |
| 2 | 9 | 15,5 | 9,0 | Отсутствие коробления | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ▲ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | | |
| 3 | 9 | 13,8 | 8,0 | Герметичность стыка | ▲ | ⊖ | ▲ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | | |
| 4 | 9 | 12,1 | 7,0 | Визуальное качество | ⊖ | ▲ | ⊖ | ▲ | ⊖ | ▲ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | | |
| 5 | 9 | 13,8 | 8,0 | Быстрое производство | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ▲ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | | |
| 6 | 3 | 10,3 | 6,0 | Химическая стойкость (будет помещаться продукт) | ⊖ | ▲ | ▲ | ⊖ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | | |
| 7 | 3 | 17,2 | 10,0 | Стоимость продукции | ⊖ | ▲ | ⊖ | ⊖ | ▲ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | ⊖ | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Target or Limit Value | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Max Relationship Value in Column | | | | | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | |
| Weight / Importance | | | | | 410,3 | 389,7 | 327,6 | 351,7 | 441,4 | 337,9 | 320,7 | 420,7 | 437,9 | | | | | | | | | |
| Relative Weight | | | | | 11,9 | 11,3 | 9,5 | 10,2 | 12,8 | 9,8 | 9,3 | 12,2 | 12,7 | | | | | | | | | |

Рисунок 3.1 – Дом качества для детали типа «Крышка тары»

Одним из важных факторов инжекционного литья тонкостенных изделий является эффективность системы охлаждения литевых форм. Сокращение времени охлаждения всего на одну или две секунды может привести к увеличению производительности на 10-20%. Это уже оказывает непосредственное влияние на экономическую эффективность производственного процесса [7]. Но экономия времени является не единственной важной задачей, решение которой обеспечивает правильно спроектированная система охлаждения. Контролируемое охлаждение всей детали имеет во многом решающее значение для обеспечения точности размеров и механических свойств детали. Оптимизированное охлаждение деталей позволяет уменьшать их коробление, снизить остаточные напряжения в материале отливки [82]. Зачастую процесс охлаждения занимает большую часть цикла литья и поэтому является главным аспектом возможности экономии и увеличения производительности. Очевидно, что правильно спроектированная система охлаждения является ключевым компонентом конструкции литевой пресс-формы, способствует повышению качества литых деталей, обеспечивает снижение времени литейного цикла и, следовательно, повышению рентабельности литейного производства.

Наиболее эффективный вариант конструкции системы охлаждения пресс-формы – это конформная система охлаждения. При конформном охлаждении формообразующих деталей пресс-формы система охлаждения образуют распределенную сеть каналов, расположенных эквидистантно поверхности отливаемой детали [83]. При такой топологии каналов обеспечивается равномерная и эффективная теплопередача со всей формообразующей поверхности пресс-формы. Геометрию каналов охлаждения не всегда возможно получить в металле механической обработкой с помощью стандартных инструментов. Поэтому производство формообразующих деталей пресс-форм (матрицы, пуансоны, профильные вставки) с конформной системой охлаждения стало возможным главным образом с помощью аддитивных технологий. Аддитивное производство позволяет создавать охлаждающие каналы сложной геометрической формы в точном соответствии с расчетами, без ограничений, свойственных обычным

методам механической обработки [4]. Современные системы компьютерного анализа инжекционного литья методом конечных элементов [84-86], таких как Moldflow или Moldex, позволяют проектировщику получить «цифровой двойник» для анализа технологических параметров инжекционного литья и проектных решений по конструкции пресс-формы. Встроенные инструменты анализа позволяют получить распределения температур, напряжений, усадки, короблений и прочих параметров на всех этапах процесса. Однако, четкие численные сравнительные характеристики эффективности различных вариантов реализации системы охлаждения, которые позволили бы сформулировать оптимизационную задачу, в технической литературе не приводятся [6]. В данном исследовании предлагается практическое использование ряда таких сравнительных характеристик.

Целью исследования является разработка численных критериев оценки качества инжекционного литья на этапе проектирования пресс-формы для сравнительного анализа вариантов ее конструкции, в частности оценки эффективности системы охлаждения с помощью ряда характеристик, которые можно получить с помощью «цифрового двойника» процесса.

Под качеством инжекционного литья понимается обеспечение условий формообразования в пресс-форме, способствующих получению качественной отливки при минимальном времени цикла.

3.1 КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИНЖЕКЦИОННОГО ЛИТЬЯ И ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРЕСС-ФОРМЫ

На основании QFD-метода была проведена разработка критериев оценки качества инжекционного литья для сравнения двух вариантов систем охлаждения пресс-формы – конформной и традиционной.

Для оценки качества и эффективности были выбраны следующие характеристики: равномерность охлаждения, средняя скорость охлаждения, коэффициент искажения формы отливки и ее неплоскостность. Кроме того,

эффективность охлаждения оценивалась дифференцированно для каждого канала по интенсивности теплоотдачи канала.

1. Равномерность охлаждения (по температурному полю) обеспечивает равномерность усадки и, следовательно, ведет к минимальным искажениям формы отливки. В качестве числовой характеристики равномерности охлаждения целесообразно принять сравнение изменения градиента температуры во времени в различных точках отливки после заполнения формообразующей полости пресс-формы. Иными словами, постоянство градиента температуры при охлаждении отливки в пресс-форме в любых ее точках должно обеспечить равномерность усадки и отсутствие усадочных напряжений.

Обозначим:

S – срединная поверхность отливки, т.е. поверхность, равноудаленная от точек внешней поверхности отливки;

$(T_{\min})_m = T(x_i, x_j, x_k)_m$ – локальный минимум температуры;

$(T_{\max})_n = T(x_i, x_j, x_k)_n$ – локальный максимум температуры;

l_{mn} – кривая наименьшей длины между точками $(x_i, x_j, x_k)_n$ и $(x_i, x_j, x_k)_m$;

$l_{mn} \subset S$ – среднее изменение температурного поля между названными точками в период $\{t_0, t_1\}$.

Среднее за период времени $\{t_0, t_1\}$ изменение градиента температуры ΔT_{mn} вдоль срединной плоскости между любыми точками $(x_i, x_j, x_k)_n, (x_i, x_j, x_k)_m$ определится зависимостью (3.1)

$$\begin{aligned} \Delta T_{mn} &= \frac{1}{(t_1 - t_0) l_{mn}} \int_{t_0}^{t_1} \int_{(T_{\min})_m}^{(T_{\max})_n} \text{grad } T \cdot \bar{l}_1 dl dt = \\ &= \frac{1}{(t_1 - t_0) l_{mn}} \int_{t_0}^{t_1} \int_{(T_{\min})_m}^{(T_{\max})_n} \frac{\partial T}{\partial x_i} \cdot \frac{\frac{\partial l}{\partial x_i} dl dt}{\sqrt{\left(\frac{\partial l}{\partial x_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial l}{\partial x_j}\right)^2 + \left(\frac{\partial l}{\partial x_k}\right)^2}} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Сформулируем условие равномерности усадки в зависимости от температурного фактора, способствующего минимальным короблениям (3.2).

$$\sum_{m,n}^N \text{delta}T_{mn} \rightarrow \min \quad (3.2)$$

для множества пар характерных точек $\left\{ (x_i, x_j, x_k)_n, (x_i, x_j, x_k)_m \right\} \subset S$; $n=1\dots N, m=1\dots N$

при ограничениях:

- 1) $t_1 - t_0 \leq t_{\max}$ – ограничение по времени цикла;
- 2) $\left(\text{delta}T_{mn} \leq (\text{delta}T_{mn})_{\max} \left| \{x_i, x_j, x_k\}_m, \{x_i, x_j, x_k\}_n \subset S \right| \right)$ – ограничение по

максимально допустимому значению локальной усадки.

Для оценки параметра $\text{delta}T_{mn}$ между двумя характерными точками $(x_i, x_j, x_k)_n, (x_i, x_j, x_k)_m$ в настоящем исследовании использовались две величины p_1 и p_2 :

$$\left\{ \begin{array}{l} p_1 = \frac{(T_{\max} - T_{\min})_{t_1} - (T_{\max} - T_{\min})_{t_2}}{(t_2 - t_1)L} \\ p_2 = \frac{(T_{\max} - T_{\min})_{t_2}}{(t_2 - t_1)L} \end{array} \right. , \quad (3.3)$$

где t_1 – время окончания заполнения пресс-формы;

L - расстояние между точками с максимальной T_{\max} и минимальной T_{\min} температурами в отливке.

Параметр p_2 характеризует неравномерность температуры в отливке в момент времени t_2 завершения выдержки под давлением. Очевидно, что параметр p_2 должен стремиться к минимуму к моменту времени t_2 . При этом чем выше p_1 – интенсивность выравнивания температуры между сопоставимыми точками отливки с наибольшей и наименьшей температурами – тем более эффективная система охлаждения пресс-формы. Чем больше параметр p_1 , тем качественнее отливка.

2. Средняя скорость охлаждения отливки V_{cp} определяет среднюю по объему отливки интенсивность теплоотдачи.

$$V_{cp} = \frac{1}{W(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} \int_W \frac{\partial T}{\partial t} dW dt , \quad (3.4)$$

где W – объем отливки.

Чем выше V_{cp} , тем интенсивнее остывает отливка и, следовательно, уменьшается t_2 и время цикла. Следует обратить внимание, что параметр p_2 при этом должен быть минимальным.

Для оценки V_{cp} в данном исследовании использовали локальные значения $V_i = \left(\frac{T_{t_2} - T_{t_1}}{t_2 - t_1} \right)_i$, которые измерялись в трех точках: в центре отливки, на краю отливки и на среднем радиусе отливки.

3. Искажение формы отливки возникает из-за того, что геометрия формообразующей полости пресс-формы обычно получается масштабированием геометрии отливки на усредненный коэффициент объемной усадки. На самом деле коэффициент усадки – величина не постоянная, а вариативная в зависимости от характера охлаждения каждой локальной области отливки.

Локальный линейный коэффициент усадки в окрестности точки i определяется зависимостью:

$$k_{i \text{ усадки}} = \frac{R_{i \text{ прессформы}}}{R_{i \text{ отливки}}} = 1 + \frac{D_i}{R_{i \text{ отливки}}}, \quad (3.5)$$

где $R_{i \text{ отливки}}$ – расстояние от нуля системы координат, расположенной в центре отливки до рассматриваемой точки;

$D_i = R_{i \text{ прессформы}} - R_{i \text{ отливки}}$ – смещение точки i отливки от ее номинального положения в пресс-форме.

$$\text{Средний коэффициент линейной усадки } k_{\text{усадки ср.}} = 1 + \frac{D_{cp}}{R_{\text{отливки ср}}},$$

где $R_{\text{ср отливки}} = R_{\text{max}} / 2$ – средний радиус отливки;

$$D_{cp} - \text{среднее смещение. } D_{cp} = \frac{1}{R_{\text{max}}} \int_0^{R_{\text{max}}} D_i dr = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N D_{i-k} \delta_{i-k};$$

D_{i-k} – среднее смещение точек отливки между значениями D_i и D_k для интервала $j = 1 \dots N$;

δ_{i-k} – отнесенное к N количество значений смещений, попадающих в интервал $[D_i, D_k]$.

D_{i-k}, δ_{i-k} определяются по гистограмме смещений точек отливки при усадке.

Действительное и расчетное расстояния до некоторой точки i на отливке определяются зависимостями (3.6).

$$R_{i \text{ отливки}}^{\text{расчет}} = \frac{R_{i \text{ прессформы}}}{k_{\text{усадка}}} \quad (3.6)$$

Численно искажение геометрии отливки вследствие неравномерности ее усадки можно оценить с помощью коэффициента искажения формы отливки.

С учетом изложенного определим коэффициент искажения геометрии (3.7) как средневзвешенную величину модуля относительной погрешности расчетного значения $R_{i \text{ отливки}}^{\text{расчет}}$.

$$k_{\text{искажения}} = \sum \left| \frac{R_{i \text{ отливки}}^{\text{расчет}} - R_{i \text{ отливки}}^{\text{действ}}}{R_{i \text{ отливки}}^{\text{расчет}}} \right| \quad (3.7)$$

При «качественной» системе охлаждения гистограмма смещений точек отливки при усадке не должна иметь провалов.

4. Параметр неплоскостности оценивается по результатам САЕ- анализа.

5. Величина теплосъема определяется количеством теплоты, которое передается каждому каналу системы охлаждения.

Для апробации методики оценки качества изделий была взята тонкостенная отливка типа «Крышка тары», получаемая методом инжекционного литья с применением конформной системы охлаждения.

3.2 РАСЧЕТ КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА ТОНКОСТЕННОЙ ДЕТАЛИ ПРИ КОНФОРМНОЙ СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ

Для апробации методики оценки качества изделий была взята тонкостенная отливка типа «Крышка тары» (рисунок 3.2), получаемая методом инжекционного литья с применением конформной системы охлаждения (рисунок 3.3). Для конформной системы охлаждения сеть каналов охлаждения была смоделирована по форме, приближенной к форме изделия.

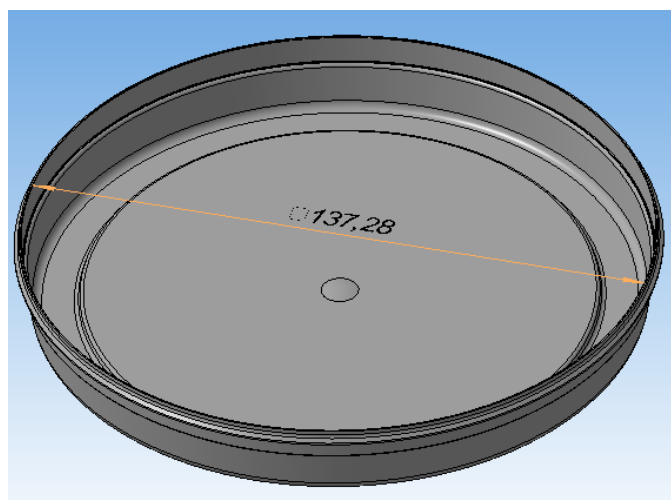


Рисунок 3.2 – Модель детали типа «Крышка тары»

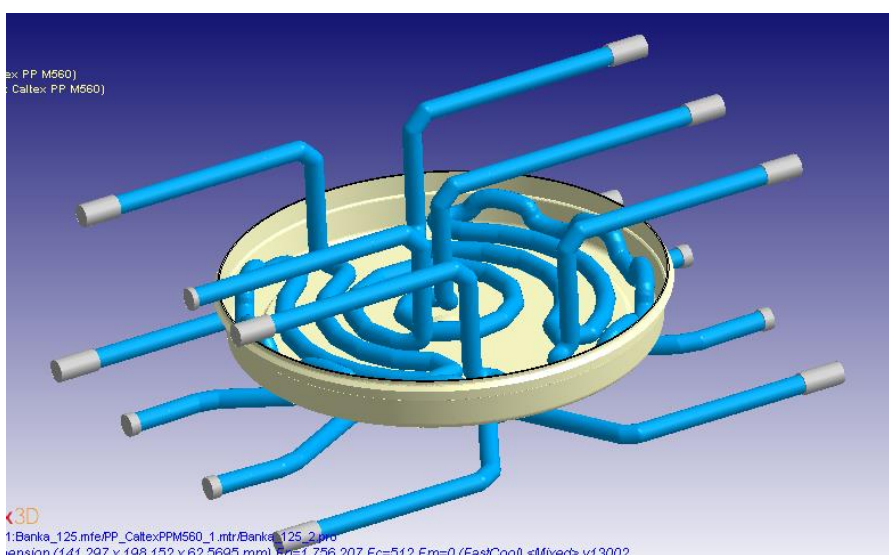


Рисунок 3.3 – Смоделированная система каналов охлаждения при конформной системе

Для оценки системы охлаждения был использован метод численного имитационного моделирования процесса литья в программном продукте Moldex3DR13. Для этого в программном продукте Moldex 3D designer были смоделированы отливка, система подачи расплава, система охлаждающих каналов и наложена сетка конечных элементов, необходимая для дальнейших расчетов. Модель смоделированной пресс-формы и системы охлаждения представлены на рисунке 3.4.

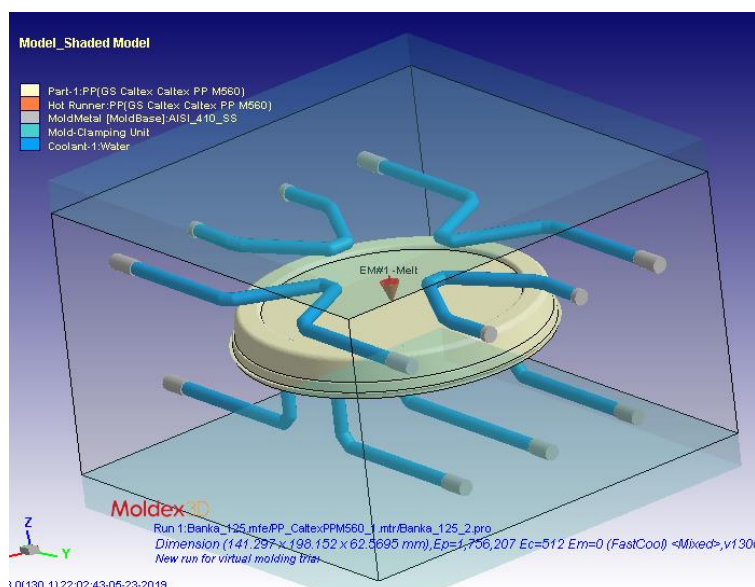


Рисунок 3.4 – Модель пресс-формы для изготовления детали типа «Крышка тары»

Материал отливки – полипропилен (PP) выбирался из базы данных реологических и механических свойств Moldex 3D аналогичный по свойствам марке материала, из которого должна быть получена натурная деталь.

Параметры термопластавтомата (ТПА) были также выбраны из базы данных Moldex 3D и полностью соответствуют параметрам оборудования, на котором будет производиться отливка опытно-промышленная партия крышек для испытания пуансона с конформной системой охлаждения, полученного из заготовки, выращенной методом СЛС (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Параметры для имитационного расчета

| | | |
|--------------------------------|---------|-------------------|
| Средняя толщина детали | 2 | мм |
| Температура расплава | 220 | °С |
| Температура пресс-формы | 35 | °С |
| Температура извлечения отливки | 90 | °С |
| Плотность материала (PP) | 0,72246 | г/см ³ |
| Теплоемкость материала (PP) | 3,1 | Дж/г/°С |

Продолжение таблицы 3.1

| | | |
|--|--------------------|--------------------|
| Теплопроводность материала (PP) | $15 \cdot 10^{-2}$ | Вт/м ^{°C} |
| Параметры заполнения пресс-формы | | |
| Время заполнения | 0,13 | с |
| Температура расплава | 220 | °C |
| Температура пресс-формы | 35 | °C |
| Максимальное давление впрыска | 171 | МПа |
| Объем впрыска | 27,38 | См ³ |
| Время выдержки под давлением | | |
| Время выдержки под давлением | 2 | Сек. |
| Максимальное давление выдержки под давлением | 171 | МПа |
| Параметры охлаждения пресс-формы | | |
| Время охлаждения | 2 | Сек. |
| Время открытия пресс-формы | 5 | Сек. |
| Температура извлечения | 90 | °C |
| Температура воздуха | 25 | °C |
| Время цикла | 9,13 | Сек. |

Расчет критериев оценки качества отливки

Для расчета равномерности охлаждения необходимо разбить деталь на локальные области: первая – область постоянной толщины детали, вторая – область фланца (утолщения). Разделение детали на локальные области представлены на рисунке 3.5.

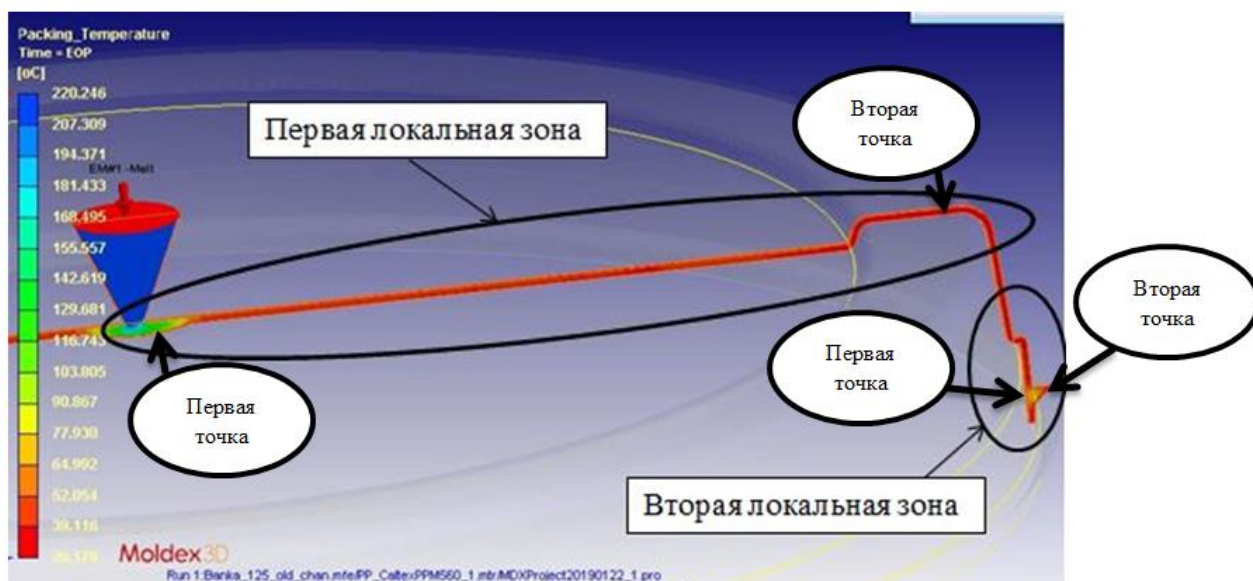


Рисунок 3.5 – Разделение детали на локальные области

Результаты симуляции процесса инъекционного литья крышки представлены на рисунках 3.6–3.10.

Параметры равномерности охлаждения в первой локальной области:

$$\begin{cases} p_1 = \frac{(207 - 100)_{0.517} - (100 - 37)_{1.513}}{(1.513 - 0.517)74} = 0.597 \\ p_2 = \frac{(100 - 37)_{1.513}}{(1.513 - 0.517)74} = 0.855 \end{cases}$$

Параметры равномерности охлаждения во второй локальной области:

$$\begin{cases} p_1 = \frac{(100 - 60)_{0.517} - (59 - 46)_{1.513}}{(1.513 - 0.517)4} = 6.683 \\ p_2 = \frac{(59 - 46)_{1.513}}{(1.513 - 0.517)4} = 3.263 \end{cases}$$

Средняя скорость охлаждения отливки V_{cp} определяет среднюю по объему отливки интенсивность теплоотдачи.

Средняя скорость охлаждения в центре отливки:

$$V_{центр} = \left(\frac{203 - 131}{1.513 - 0.517} \right) = 72.3 \text{ град}/\text{с},$$

Средняя скорость охлаждения в середине радиуса отливки:

$$V_{\text{серед}} = \left(\frac{126 - 33}{1.513 - 0.517} \right) = 93.4 \text{ } ^\circ\text{rad}/\text{c},$$

Средняя скорость охлаждения на торце отливки:

$$V_{\text{торец}} = \left(\frac{73 - 23}{1.513 - 0.517} \right) = 50.2 \text{ } ^\circ\text{rad}/\text{c},$$

Для расчета среднего коэффициента усадки:

$$R_{\text{cp}} = 74 / 2 = 37 \text{ - средний радиус;}$$

D_{cp} - среднее смещение. $D_{\text{cp}} = 0.63$ (считаем, как среднеарифметическое значение коробления из гистограммы, изображенной на рисунке 3.6).

$$k_{\text{усадкир.}} = 1 + \frac{0.63}{37} = 1.02$$

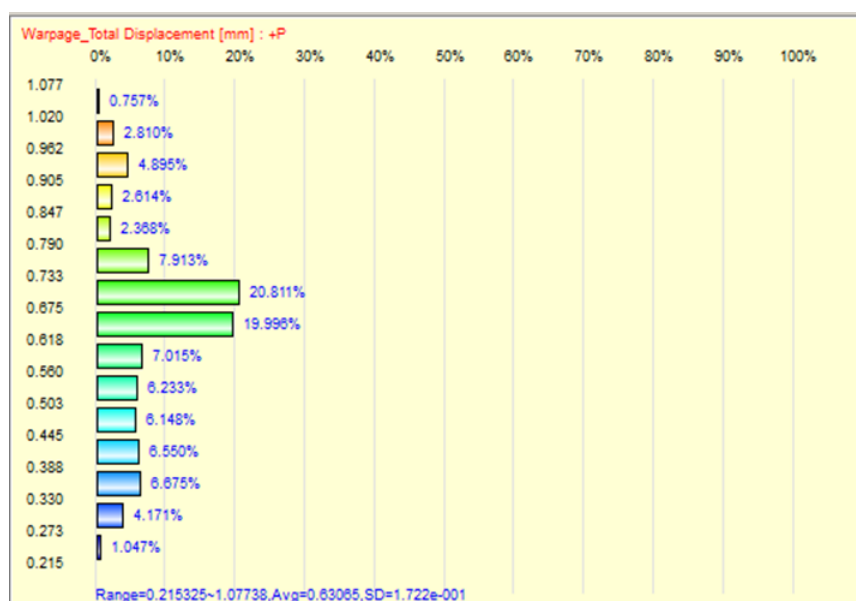


Рисунок 3.6 – Гистограмма величин результирующего коробления

Распределение температуры отливки после впрыска (рисунок 3.7) равномерное в окружном направлении (колебания не более 10–15 град). Изменение температуры составляет в диапазоне 235 градусов в центре отливки и 150 градусов на ее периферии в радиальном направлении (на этапе выдержки под давлением) до равномерной температуры около 110 градусов по остальной части отливки.

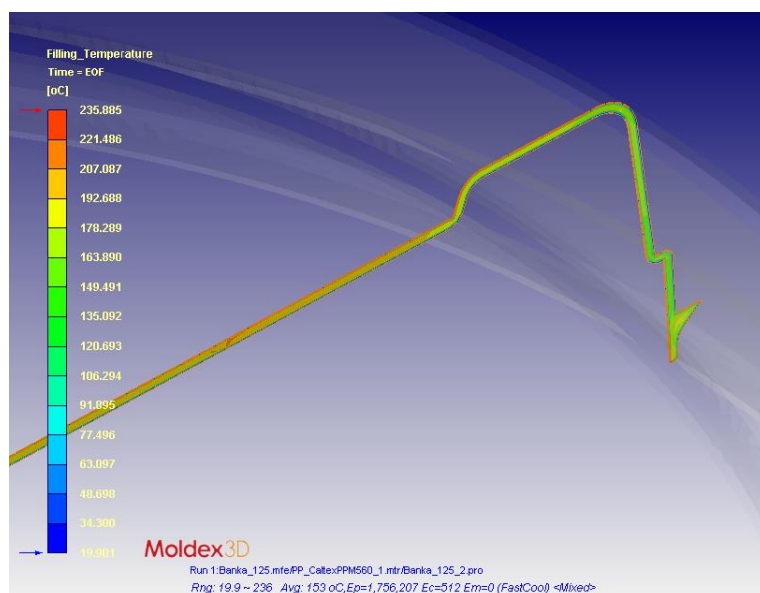


Рисунок 3.7 – Распределение температуры в сечении отливки после впрыска

Эффективность конформной системы охлаждения (в условных балах) приведена на рисунке 3.8. Видно, что конформные каналы охлаждения (зигзагообразные спирали) пуансона на 20 баллов эффективнее прямых каналов матрицы, выполненных традиционным способом сверления и более чем на 12 баллов эффективнее центрального спирального канала пуансона.

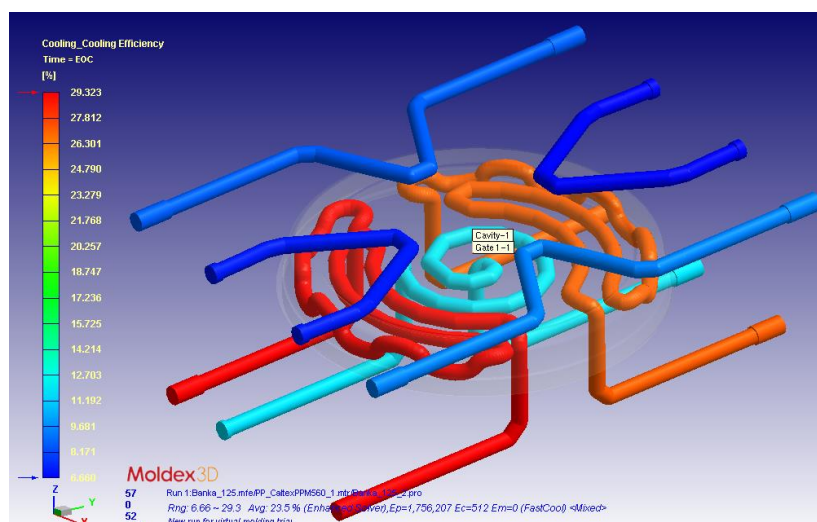


Рисунок 3.8 – Сравнительная эффективность каналов конформной системы охлаждения

Эффективность системы охлаждения лучше всего анализировать по величине коробления – рисунок 3.9, в сравнении с размерами номинальной модели.

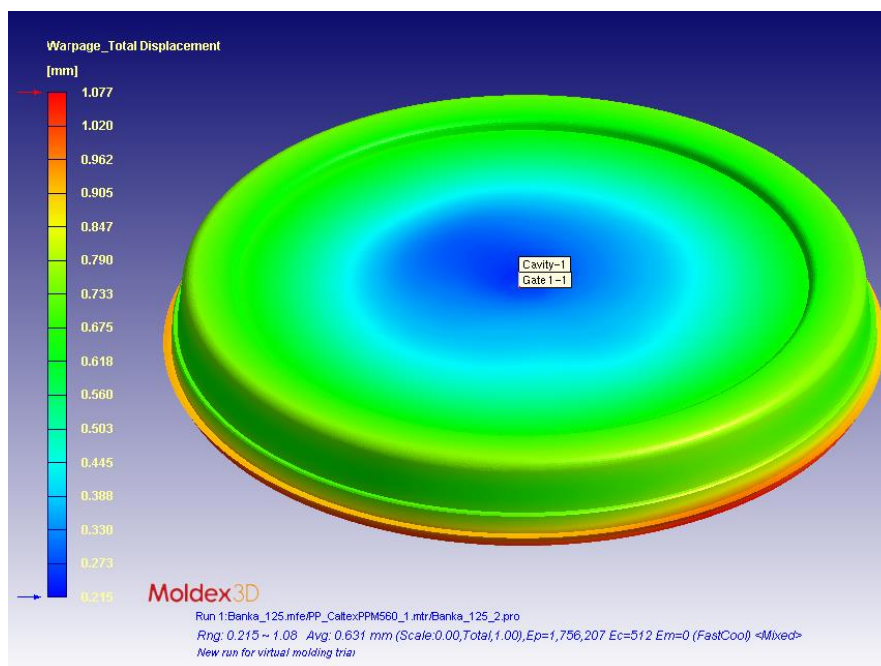


Рисунок 3.9 – Результирующее коробление (показывает длину вектора полного перемещения (учитываются все эффекты) после того, как деталь выталкивается из пресс-формы и охлаждается до комнатной температуры)- значения приведены относительно системы координат модели

Неплоскостность рассчитывается как разница между смещением плоских областей отливки (рисунок 3.10). Видно, что максимальная неплоскостность – в пределах 0,7 мм наблюдается в местах, где каналы охлаждения максимально удалены от поверхности отливки (рисунок 3.8 и рисунок 3.10).

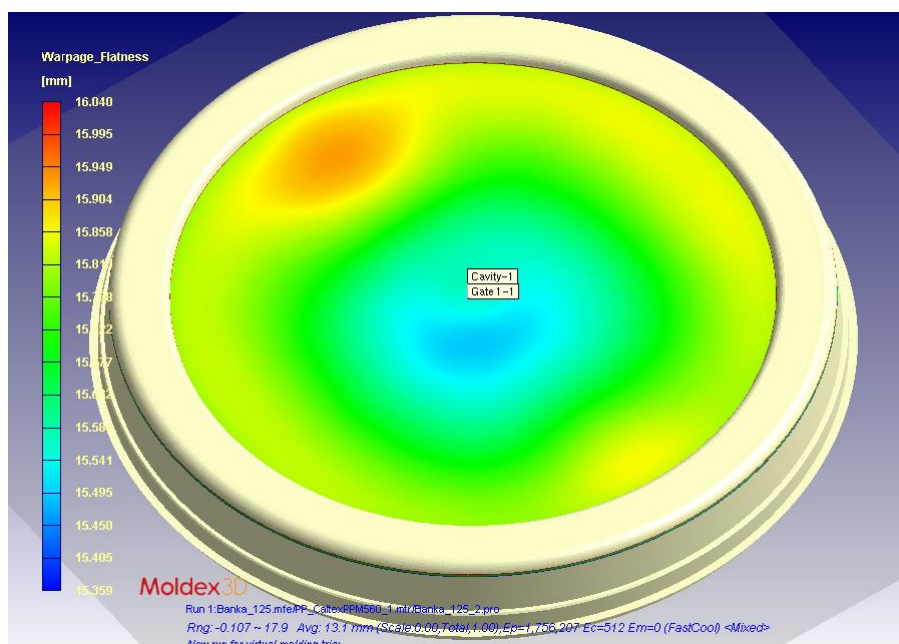


Рисунок 3.10 – Смещение плоских областей отливки – расстояние между узлами деформированной сетки КЭ до заданной пользователем контрольной плоскости

3.3 РАСЧЕТ КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА ТОНКОСТЕННОЙ ДЕТАЛИ ПРИ ТРАДИЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ

Для традиционной системы охлаждения сеть каналов охлаждения была смоделирована и изображена на рисунке 3.11. Аналогично конформной системы охлаждения был использован метод численного имитационного моделирования процесса литья в программном продукте Moldex3DR13. Параметры расчета также были взяты аналогично конформной системы охлаждения.

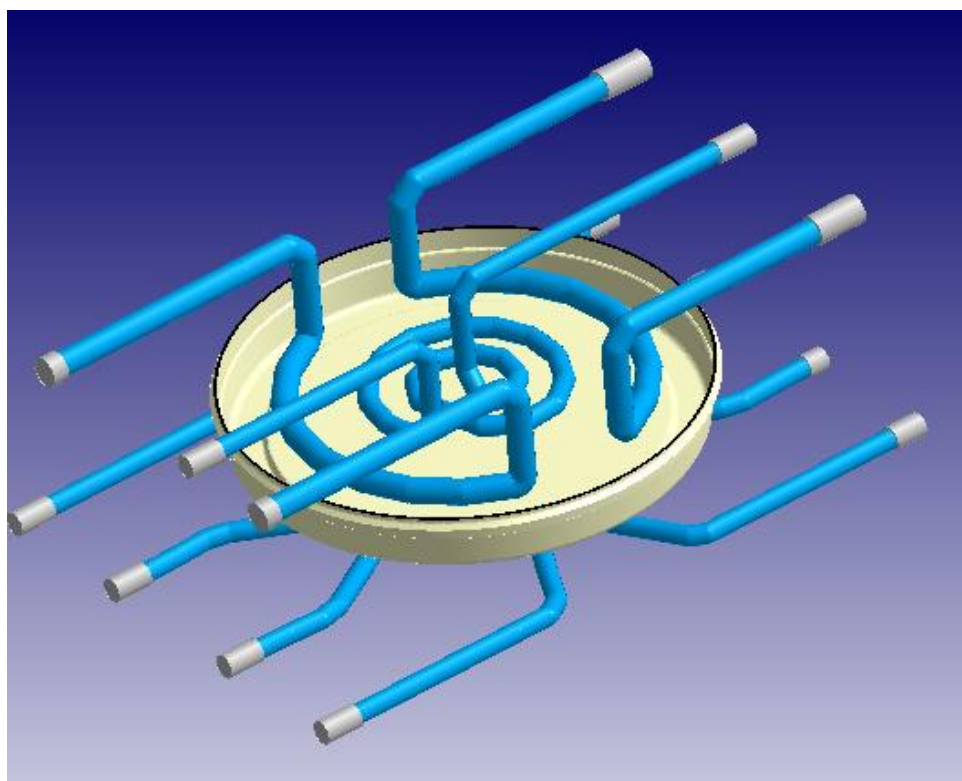


Рисунок 3.11 – Смоделированная система каналов охлаждения при традиционной системе

Расчет критериев оценки качества отливки

Параметры равномерности охлаждения в первой локальной области:

$$\begin{cases} p_1 = \frac{(207 - 103)_{0.517} - (143 - 52)_{1.513}}{(1.513 - 0.517)74} = 0.176 \\ p_2 = \frac{(143 - 52)_{1.513}}{(1.513 - 0.517)74} = 1.235 \end{cases}$$

Параметры равномерности охлаждения во второй локальной области:

$$\begin{cases} p_1 = \frac{(130 - 60)_{0.517} - (78 - 52)_{1.513}}{(1.513 - 0.517)4} = 11.044 \\ p_2 = \frac{(78 - 52)_{1.513}}{(1.513 - 0.517)4} = 6.526 \end{cases}$$

Средняя скорость охлаждения отливки V_{cp} определяет среднюю по объему отливки интенсивность теплоотдачи.

Средняя скорость охлаждения в центре отливки:

$$V_{центр} = \left(\frac{208 - 167}{1.513 - 0.517} \right) = 41.2 \text{ град}/\text{с},$$

Средняя скорость охлаждения в середине радиуса отливки:

$$V_{\text{серед}} = \left(\frac{142 - 64}{1.513 - 0.517} \right) = 78.3 \text{ } ^\circ\text{рад}/\text{с},$$

Средняя скорость охлаждения на торце отливки:

$$V_{\text{торец}} = \left(\frac{116 - 84}{1.513 - 0.517} \right) = 32.1 \text{ } ^\circ\text{рад}/\text{с},$$

Для расчета среднего коэффициента усадки:

$$R_{cp} = 74 / 2 = 37 \text{ - средний радиус;}$$

D_{cp} - среднее смещение. $D_{cp} = 0.685$ (считаем, как среднеарифметическое значение коробления из гистограммы, изображенной на рисунке 3.11).

$$k_{\text{усадкиср.}} = 1 + \frac{0.685}{37} = 1.02$$

Результаты симуляции процесса инжекционного литья крышки представлены на рисунках 3.12 – 3.15.

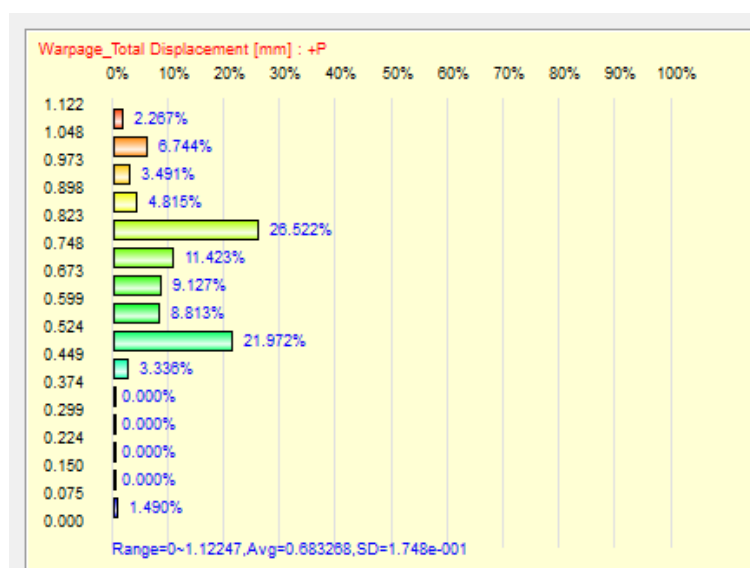


Рисунок 3.12 – Гистограмма величин результирующего коробления

Распределение температуры отливки после впрыска (рисунок 3.13) неравномерно в окружном направлении (колебания более 20–25 град). Изменение температуры составляет в диапазоне 250 градусов в центре отливки и 220 градусов

на ее периферии в радиальном направлении до равномерной температуры около 110 град по остальной части отливки.

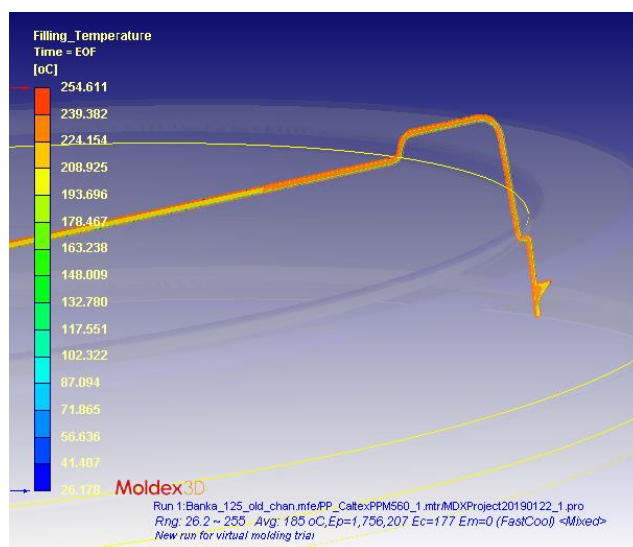


Рисунок 3.13 – Распределение температуры в сечении отливки после впрыска

Эффективность системы охлаждения лучше всего анализировать по величине коробления – рисунок 3.14, в сравнении с размерами номинальной модели. Наиболее наглядно видны дефекты традиционной системы охлаждения (матрица) при анализе неплоскостности центральной части крышки. Неплоскостность рассчитывается как разница между смещением плоских областей отливки (рисунок 3.15). При традиционной системе охлаждения неплоскостность центральной части крышки изменяется в пределах до 1,3 мм в местах, где каналы охлаждения максимально удалены от поверхности отливки (рисунок 3.11 и рисунок 3.15).

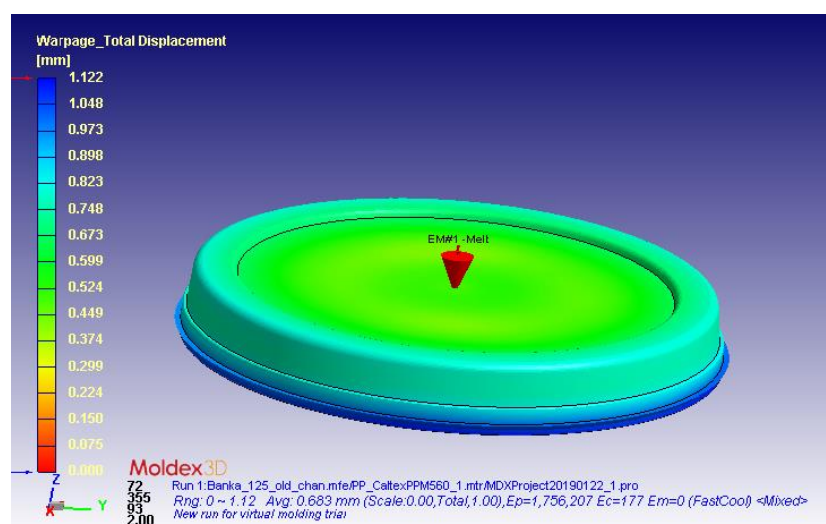


Рисунок 3.14 – Результирующее коробление (показывает длину вектора полного перемещения (учитываются все эффекты) после того, как деталь выталкивается из пресс-формы и охлаждается до комнатной температуры) – значения приведены относительно системы координат модели

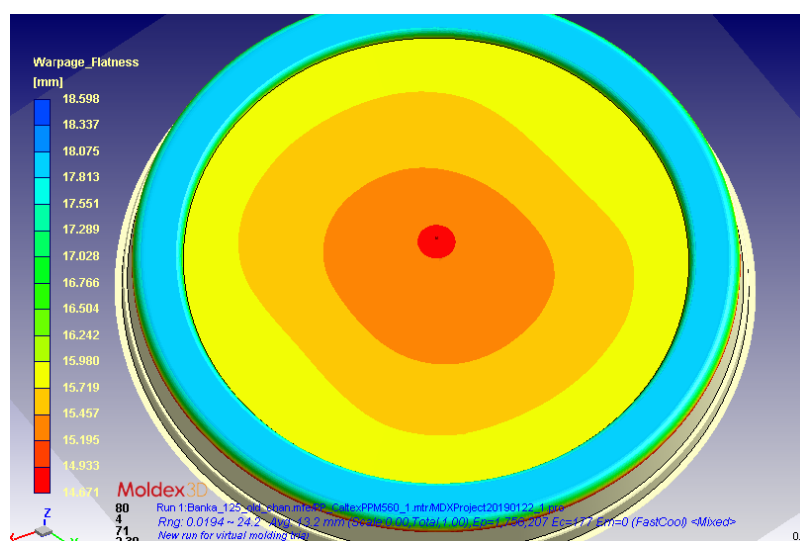


Рисунок 3.15 – Смещение плоских областей отливки – расстояние между узлами деформированной сетки КЭ до заданной пользователем контрольной плоскости

3.4 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ТОНКОСТЕННОГО ИЗДЕЛИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ

В таблице 3.2 приведены результаты расчета критериев оценки качества при различных вариантах систем охлаждения.

Таблица 3.2 – Сравнение результатов расчета критериев оценки качества при различных вариантах систем охлаждения

| Критерии оценки качества | Конформная система охлаждения | Традиционная система охлаждения |
|---|--|---|
| Гистограмма смещений точек отливки при усадке | Для обеспечения точности изготовления изделия гистограмма должна быть близка к гладкой кривой и не иметь провалов, которые идентифицируют неравномерность усадки по зонам отливки. На рисунке 3.5 представлена гистограмма, полученная при расчете конформной системы охлаждения. Гистограмма является равномерной, близка к парабалической кривой и не имеет существенных провалов. Данные результаты характеризуют равномерное усадку отливки в различных зонах. | На рисунке 3.11 представлена гистограмма, полученная при расчете традиционной системы охлаждения. У полученной гистограммы наблюдается неравномерность и провалы. Что характеризует неравномерную усадку в различных зонах отливки. |
| Параметры равномерности охлаждения в первой локальной области | $\begin{cases} p_1 = \frac{(207 - 100)_{0.517} - (100 - 37)_{1.513}}{(1.513 - 0.517)74} = 0.597 \\ p_2 = \frac{(100 - 37)_{1.513}}{(1.513 - 0.517)74} = 0.855 \end{cases}$ | $\begin{cases} p_1 = \frac{(207 - 103)_{0.517} - (143 - 52)_{1.513}}{(1.513 - 0.517)74} = 0.176 \\ p_2 = \frac{(143 - 52)_{1.513}}{(1.513 - 0.517)74} = 1.235 \end{cases}$ |

Продолжение таблицы 3.2

| | | |
|--|---|---|
| Параметры равномерности охлаждения во второй локальной области | $\begin{cases} p_1 = \frac{(100-60)_{0.517} - (59-46)_{1.513}}{(1.513-0.517)4} = 6.683 \\ p_2 = \frac{(59-46)_{1.513}}{(1.513-0.517)4} = 3.263 \end{cases}$ | $\begin{cases} p_1 = \frac{(130-60)_{0.517} - (78-52)_{1.513}}{(1.513-0.517)4} = 11.044 \\ p_2 = \frac{(78-52)_{1.513}}{(1.513-0.517)4} = 6.526 \end{cases}$ |
| Средняя скорость охлаждения в центре отливки: | $V_{центр} = \left(\frac{203-131}{1.513-0.517} \right) = 72.3 \text{ } ^\circ\text{рад}/\text{с}$ | $V_{центр} = \left(\frac{208-167}{1.513-0.517} \right) = 41.2 \text{ } ^\circ\text{рад}/\text{с}$ |
| Средняя скорость охлаждения в середине радиуса отливки: | $V_{серед} = \left(\frac{126-33}{1.513-0.517} \right) = 93.4 \text{ } ^\circ\text{рад}/\text{с}$ | $V_{серед} = \left(\frac{142-64}{1.513-0.517} \right) = 78.3 \text{ } ^\circ\text{рад}/\text{с}$ |
| Средняя скорость охлаждения на торце отливки: | $V_{торец} = \left(\frac{73-23}{1.513-0.517} \right) = 50.2 \text{ } ^\circ\text{рад}/\text{с}$ | $V_{торец} = \left(\frac{116-84}{1.513-0.517} \right) = 32.1 \text{ } ^\circ\text{рад}/\text{с}$ |
| Средний коэффициент линейной усадки | $k_{усадкиер.} = 1 + \frac{0.63}{37} = 1.02$ | $k_{усадкиер.} = 1 + \frac{0.685}{37} = 1.02$ |
| Распределение температуры в сечении отливки после впрыска | <p>Распределение температуры отливки после впрыска равномерное в окружном направлении (колебания не более 10 – 15 град). Изменение температуры составляет в диапазоне 235 градусов в центре отливки и 150 градусов на ее периферии в радиальном направлении (на этапе выдержки под давлением) до равномерной температуры около 110 градусов по остальной части отливки.</p> | <p>Распределение температуры отливки после впрыска неравномерно в окружном направлении (колебания более 20 – 25 град). Изменение температуры составляет в диапазоне 250 градусов в центре отливки и 220 градусов на ее периферии в радиальном направлении до равномерной температуры около 110 град по остальной части отливки.</p> |

Продолжение таблицы 3.2

| | | |
|-----------------|--|---|
| Неплоскостность | Максимальная неплоскостность (рисунок 3.9) находится в пределах 0,7 мм и наблюдается в местах, где каналы охлаждения максимально удалены от поверхности отливки. | При традиционной системе охлаждения неплоскостность (рисунок 3.14) центральной части крышки изменяется в пределах до 1,3 мм в местах, где каналы охлаждения максимально удалены от поверхности отливки. Неплоскостность превышает значение для отливки с конформной системой охлаждения почти в 2 раза. |
|-----------------|--|---|

В результате исследования была апробирована методика оценки качества изделий на примере тонкостенной отливки типа «Крышка тары» [87], получаемой методом инжекционного литья с применением конформной и традиционной систем охлаждения.

Был предложен ряд численных критериев оценки качества инъекционного литья на этапе проектирования пресс-формы для сравнительного анализа вариантов ее конструкции по результатам процесса симуляции инъекционного литья в САЕ-системе. Предложенные критерии позволяют произвести количественный анализ эффективности и равномерного охлаждения отливки, обеспечивающие минимальные коробления и неплоскостность отливки.

Сравнительный анализ с использованием разработанных критериев оценки качества в программном продукте Moldex3DR13 показал эффективность конформной системы охлаждения, выполненной в виде зигзагообразной спирали.

3.5 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

В результате исследования была апробирована принципиально новая методика сравнительного количественного анализа эффективности системы охлаждения пресс-форм, являющегося ключевым фактором, влияющим на качества отливки и производительность при инъекционном литье, особенно тонкостенных изделий.

Разработан комплекс численных критериев оценки эффективности системы охлаждения, позволяющий проводить объективное сравнение различных конструктивных вариантов.

Разработаны цифровые модели инъекционного литья полимерных тонкостенных деталей с различными системами охлаждения для тонкостенной детали «Крышка тары»:

- традиционная (сверлёная) система показала значительную неравномерность температурного поля (колебания до 25°C), высокую неплоскостность (до 1.3 мм) и неоптимальную гистограмму смещений;
- конформная система (зигзагообразная спираль, выполненная аддитивно) обеспечила равномерное охлаждение (колебания до 15°C), снизила неплоскостность почти в 2 раза (до 0.7 мм) и продемонстрировала плавную, близкую к параболической, гистограмму смещений, что свидетельствует о равномерной усадке.

Доказано преимущество конформных систем охлаждения, изготовленных с помощью аддитивных технологий, по всем ключевым критериям. Их применение позволяет не только сократить время цикла, но и существенно повысить геометрическую точность и стабильность качества отливок за счёт минимизации коробления и остаточных напряжений.

По результатам расчета было выявлено, что для обеспечения точности и качества полимерных деталей, получаемых методом инъекционного литья, наиболее оптимально использовать систему охлаждения с каналами близкими по форме к форме детали.

4 АДАПТАЦИЯ МЕТОДИКИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ОТЛИВОК НА ЭТАПЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРИ ИНЖЕКЦИОННОМ ЛИТЬЕ ИЗДЕЛИЙ С ТРЕБОВАНИЯМИ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ

Для апробации методики подбора наиболее оптимальных параметров инжекционного литья была выбрана типовая деталь типа «Шестерня» (рисунок 4.1).

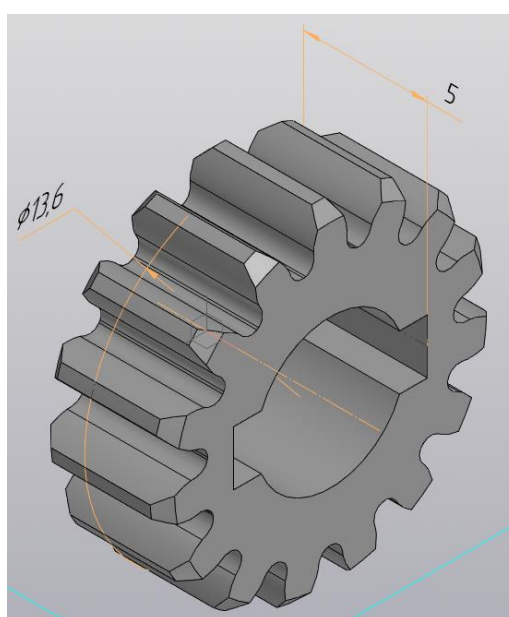


Рисунок 4.1 – Модель детали «Шестерня»

На первом этапе была смоделирована пресс-форма, шестерня и закладной элемент, необходимый для обеспечения жёсткости получаемого изделия. 16-местная пресс-форма для изготовления деталей типа шестерня методом инжекционного литья с армирующим закладным элементом представляет собой конструкцию, оснащённую горячеканальной системой с 4 точками подачи расплава через подогреваемые втулки в 4x4 формообразующих гнезда. Каждые 4 гнезда соединены с одной и четырех точек подачи расплава по схеме звезда. На рисунке 4.2 изображены подвижная и неподвижная части прессформы.

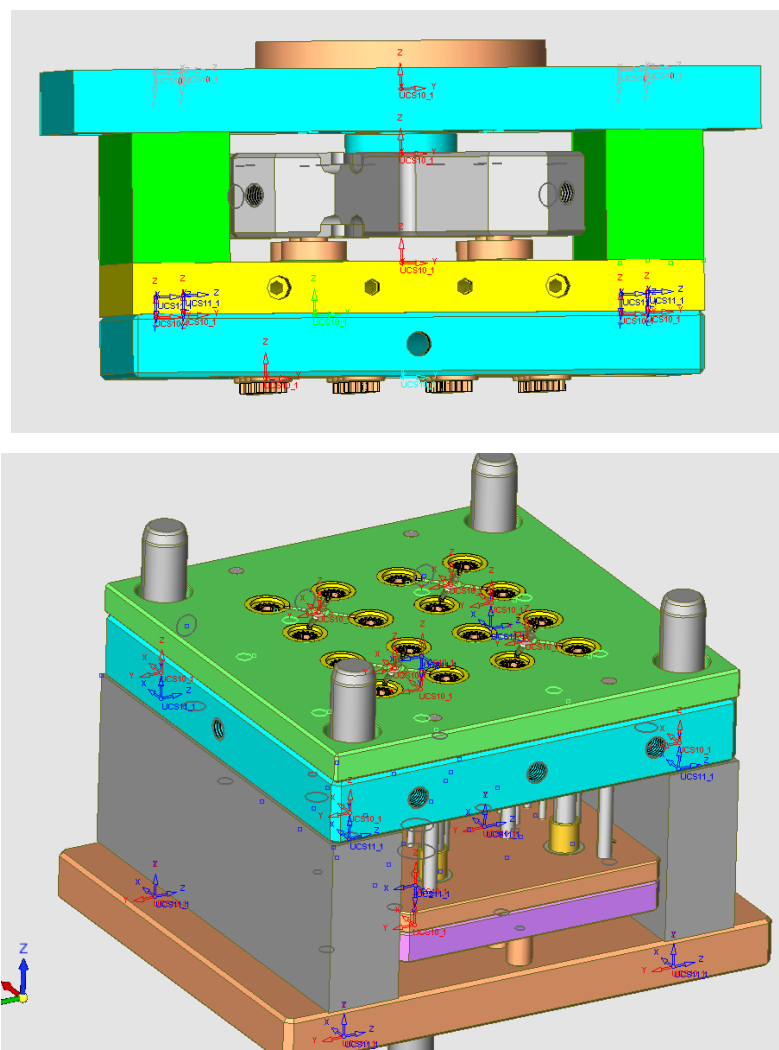


Рисунок 4.2 – Неподвижная (а) и подвижная (б) части 16-гнездовой прессформы для инъекционного литья детали «Шестерня» по гибридной технологии

На рисунке 4.3 – вид со стороны разъема на неподвижную часть прессформы: представлено крепление вставок для установки армирующего закладного элемента (АЗЭ) в отливаемые шестерни, изготовленного методом СЛС. АЗЭ устанавливается на вставки неподвижной части при размыкании пресс-формы. Фрагмент пресс-формы с установленными АЗЭ изображен на рисунке 4.4. Система подачи расплава в формообразующие вставки подвижной части пресс-формы проиллюстрирована на рисунках 4.3 и 4.4. По X – образной плите горячеканальной системы расплав поступает в подогреваемые спиральными нагревателями латунные втулки (рисунок 4.5) и далее из каждой из 4 точек распределения разводится по 4 формообразующим полостям (рисунок 4.6) с помощью крестообразных литников (рисунок 4.7). Фрагмент одного из 4 ответвлений

литника с питателем профильной вставки матрицы с размещенной в ней закладной арматурой, изготовленной методом СЛС представлен на рисунке 4.8.

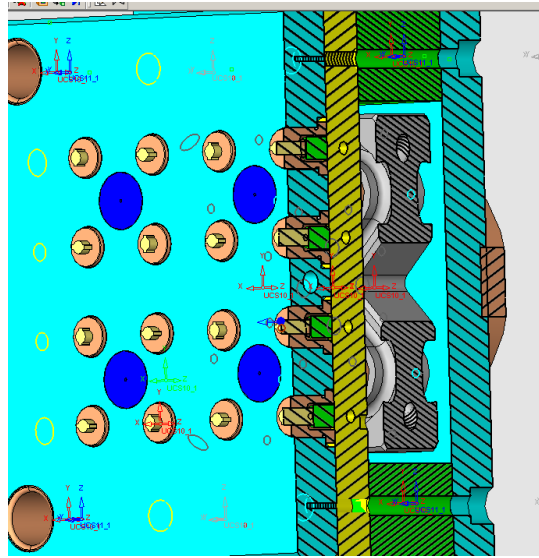


Рисунок 4.3 – Крепление вставок в неподвижной части пресс-формы для установки армирующего закладного элемента, изготовленного методом СЛС

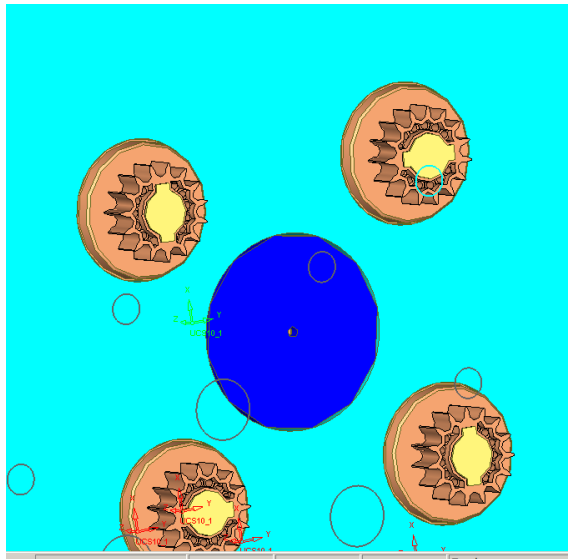


Рисунок 4.4 – Фрагмент неподвижной части в плоскости разреза с установленным закладным элементом, изготовленным методом СЛС

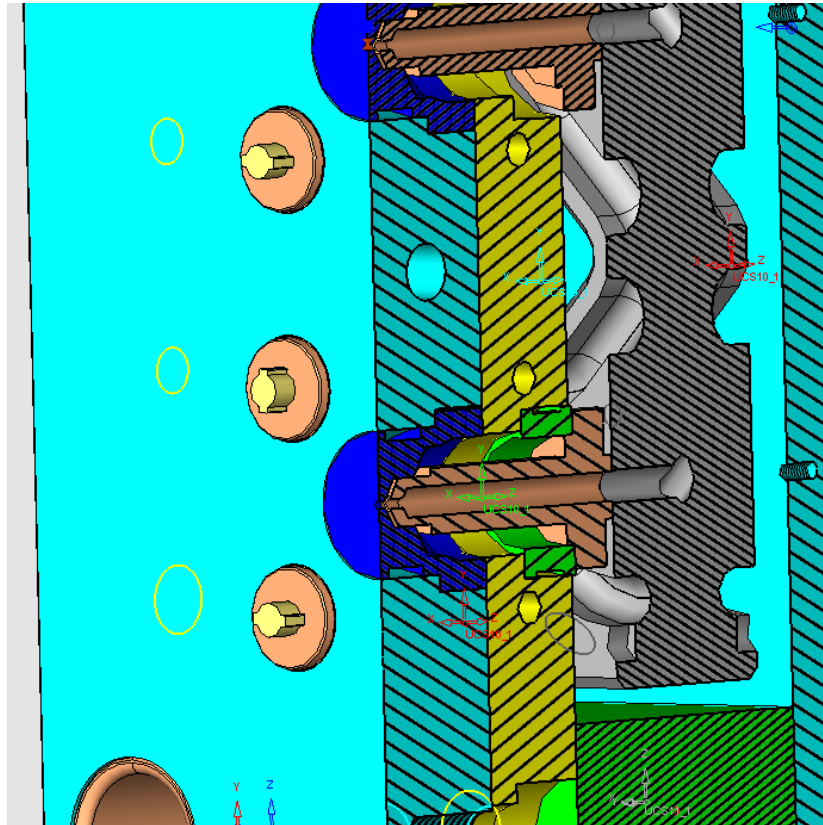


Рисунок 4.5 – Горячеканальная система подвода расплава

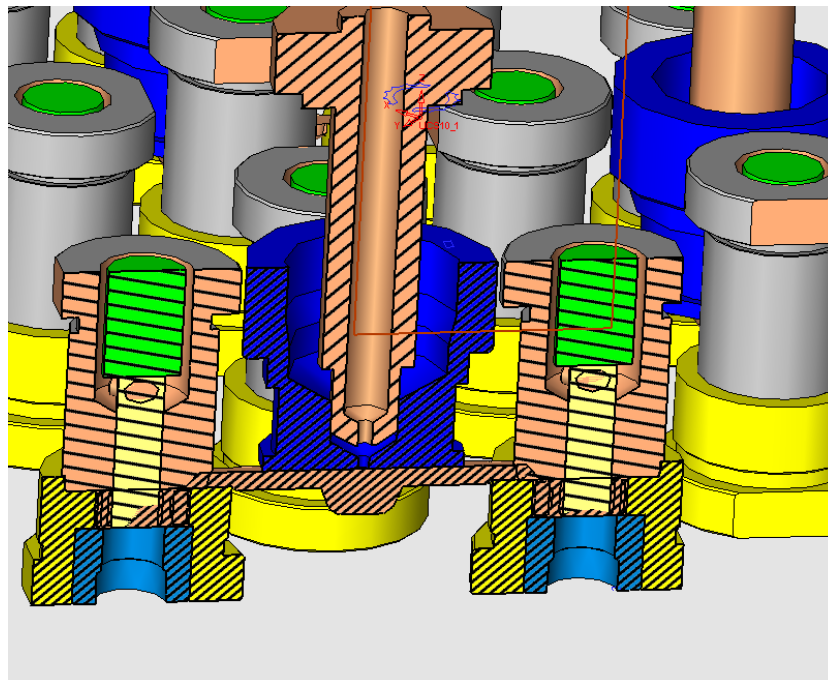


Рисунок 4.6 – Система подвода расплава в матрицы пресс-формы

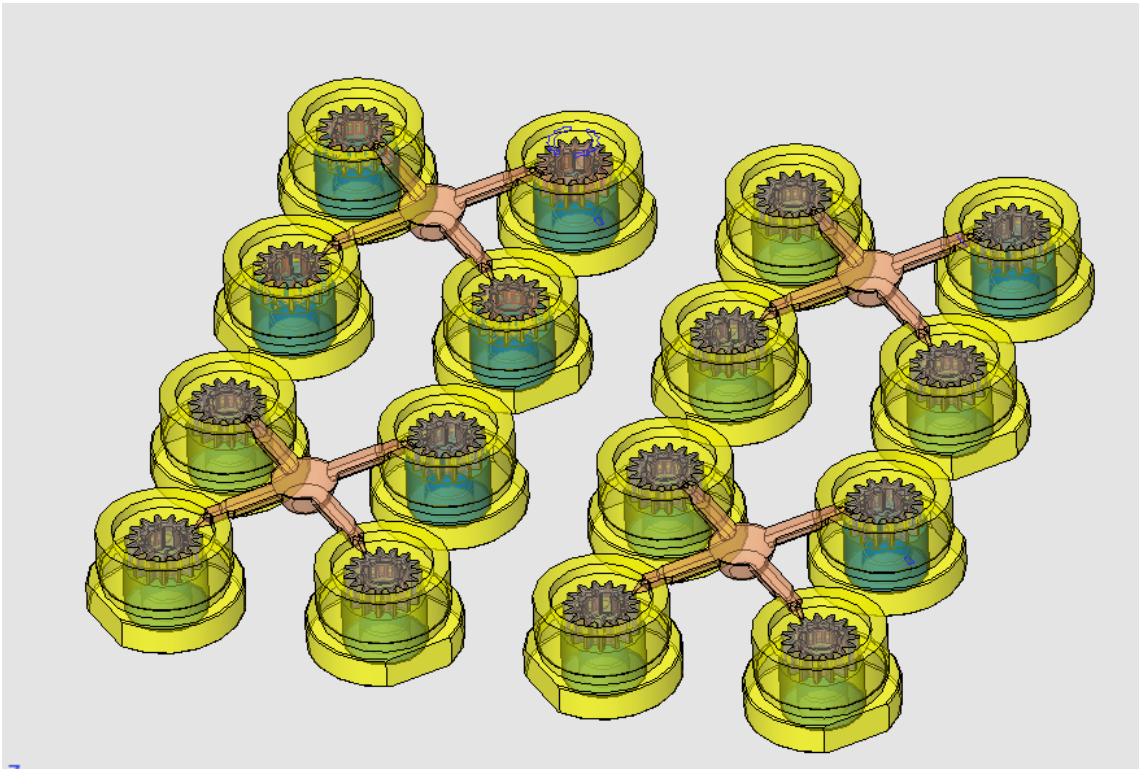


Рисунок 4.7 – Профильные матричные вставки и литники с 4 точками подвода расплава через подогреваемые втулки

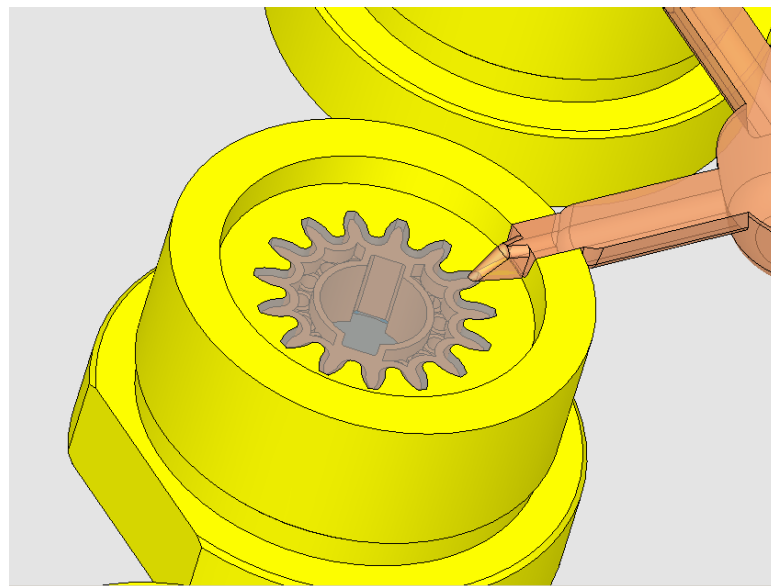


Рисунок 4.8 – Фрагмент литника с питателем профильной вставки матрицы с размещенной в ней закладной арматурой, изготовленной методом СЛС

Армирующий элемент был изготовлен способом селективного лазерного сплавления на установке SLM 280 HL (таблица 4.1) из материала 40X13. Модель

закладного элемента представлена на рисунке 4.9, на рисунке 4.10 – закладной элемент, выращенный с помощью аддитивных технологий.

Таблица 4.1 – Технические характеристики установки SLM 280 HL

| Параметры | Значения параметров |
|--|---|
| Размер рабочей камеры | |
| Длина | 280 мм |
| Ширина | 280 мм |
| Высота | 365 мм |
| Параметры печати | |
| Практическая толщина слоя | 20 – 75 мкм |
| Мин. толщина стенки | 150 |
| Скорость построения | до 55 см ³ /ч |
| Произвольно выбираемый оперативный фокус луча лазера | 50 – 115 мм |
| Скорость сканирования | 10 м/с |
| Расход защитного газа при построении | Ar/N ₂ , 2,5 л/мин |
| Расход защитного газа при продувке (начало работы) | Ar/N ₂ , 70 л/мин |
| Расход сжатого воздуха ISO | 8573-1, 18 л/мин. при 1,5 бар |
| Тип лазера | 400 / 700 / 1000 W YLR-волоконный лазер |

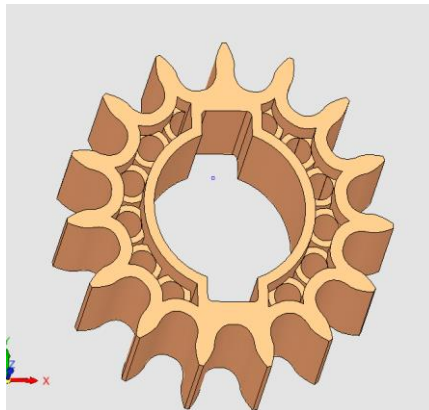


Рисунок 4.9 – Модель армирующего закладного элемента

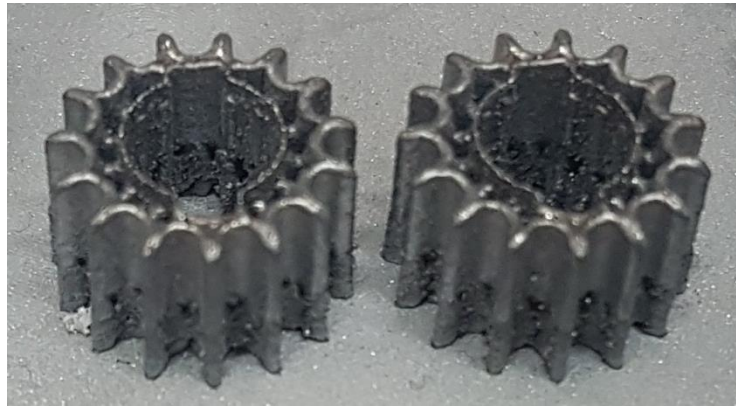


Рисунок 4.10 – Армирующий закладной элемент, выращенный с помощью аддитивных технологий

Для определения управляющих параметров процесса формообразования был использован QFD-метод. На его основании и основании анкетирования заказчика был построен «Дом качества» (рисунок 4.11).

| Row # | Max Relationship Value in Row | Relative Weight | Weight / Importance | Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows") | Column # | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-------------------------------|-----------------|---------------------|---|----------------------|----------|----------|-------------------|----------------|------------------------------|--------------------|-------------------|---|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | | | | | |
| | | | | Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats") | температура расплава | Давление | Скорость | Температура формы | Время выдержки | Усадка материала после литья | Свойства материала | Конструкция формы | | | | | | | |
| 1 | 9 | 17,5 | 10,0 | Прецизионная геометрия зубьев | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | | | | |
| 2 | 9 | 15,8 | 9,0 | Бесшумная работа, на которую влияет шероховатость поверхности | ▲ | ○ | ○ | ○ | ○ | ▲ | ▲ | ○ | | | | | | | |
| 3 | 9 | 15,8 | 9,0 | Износостойкость | ○ | ○ | ▲ | ○ | ▲ | ▲ | ○ | ▲ | | | | | | | |
| 4 | 9 | 14,0 | 8,0 | Стабильность размеров в эксплуатации | ○ | ○ | ○ | ▲ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | | | | |
| 5 | 3 | 12,3 | 7,0 | Устойчивость к динамическим нагрузкам (ударная вязкость) | ○ | ○ | ▲ | ○ | ○ | ○ | ▲ | ▲ | | | | | | | |
| 6 | 9 | 10,5 | 6,0 | Коррозионная и химическая стойкость | ○ | ▲ | ▲ | ○ | ○ | ▲ | ○ | ▲ | | | | | | | |
| 7 | 9 | 14,0 | 8,0 | Минимизация себестоимости | ○ | ▲ | ▲ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | Target or Limit Value | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult) | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | Max Relationship Value In Column | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | | | | | | | |
| | | | | Weight / Importance | 447,4 | 440,4 | 394,7 | 377,2 | 352,6 | 405,3 | 486,0 | 507,0 | | | | | | | |
| | | | | Relative Weight | 13,1 | 12,9 | 11,6 | 11,1 | 10,3 | 11,9 | 14,2 | 14,9 | | | | | | | |

Рисунок 4.11 – «Дом качества» для детали типа «Шестерня»

Для оценки отливок детали типа «Шестерня» при различных вариациях параметров инъекционного литья был использован метод численного

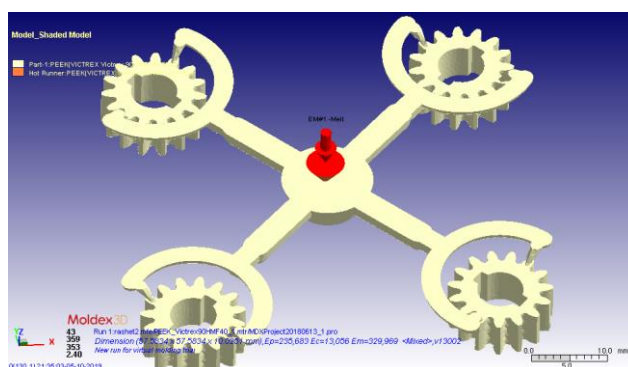


Рисунок 4.14– Представление литниковой системы с двумя точками подвода расплава в Moldex 3D

Кроме этого, рассматривались варианты изменения температуры впрыска расплава, температуры пресс-формы, давления впрыска, давления подпрессовки, времени выдержки под давлением и время цикла, также была рассмотрена возможность изменения профиля давления впрыска. Для проведения эксперимента было использовано 8 параметров с двумя значениями (максимальное и минимальное). Для составления оптимального плана экспериментов (описан в пункте 1.2) был применен принцип Тагучи [88].

Материал отливки – PEEK VICTREX Vectrex 90HMF40 выбирался из базы данных реологических и механических свойств Moldex 3D аналогичный по свойствам марке материала, из которого должна быть получена натурная деталь (рисунок 4.15).

| | |
|----------------------------|-------------------|
| Description | Description |
| Polymer | PEEK |
| Grade Name | Victrex 90HMF40 |
| Producer | VICTREX |
| Comment | 40%CF_D=1.45 g/cc |
| Last modified date | 2018/10/22 |
| Process condition | Process condition |
| Melt temperature (minimum) | 360 oC |
| Melt temperature (normal) | 380 oC |
| Melt temperature (maximum) | 385 oC |
| Mold temperature (minimum) | 190 oC |
| Mold temperature (normal) | 200 oC |
| Mold temperature (maximum) | 220 oC |
| Ejection temperature | 287 oC |
| Freeze temperature | 318 oC |

Рисунок 4.15 – Параметры материала аналога PEEK VICTREX Vectrex 90HMF40, используемый для виртуального расчета

Параметры термопластавтомата были также выбраны из базы данных Moldex 3D и полностью соответствуют параметрам оборудования, на котором будет производиться отливка опытно-промышленной партии шестерни методом инжекционного литья с армирующим закладным элементом, полученного методом СЛС.

4.1 СОСТАВЛЕНИЕ ПЛАНА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При выявлении какого-либо дефекта при производстве продукции проводится анализ проблемы. По результатам этого анализа выявляют ряд причин, влияющих на появление этого дефекта. Однако большинство этих причин возможно устранить с помощью корректирующих мероприятий, которые не требуют дополнительных затрат. Такие причины, как правило, не требуют глубокого анализа.

Для анализа более сложных причин, которые требуют глубокой детальной проработки, составляют перечень критических параметров процесса, имеющих непосредственное влияние на процесс и его стабильность.

У производственных процессов существует множество параметров, перебор сочетаний которых может потребовать большого количества времени и материальных средств. Для упрощения процедуры анализа целесообразнее использовать метод Тагути. Особенностью данного метода при планировании эксперимента является использование сбалансированных ортогональных матриц, в которых взаимодействуют разделенные на уровни управляемые и дестабилизирующие параметры (таблица 4.2) [89].

Таблица 4.2 – Управляемые и дестабилизирующие параметры

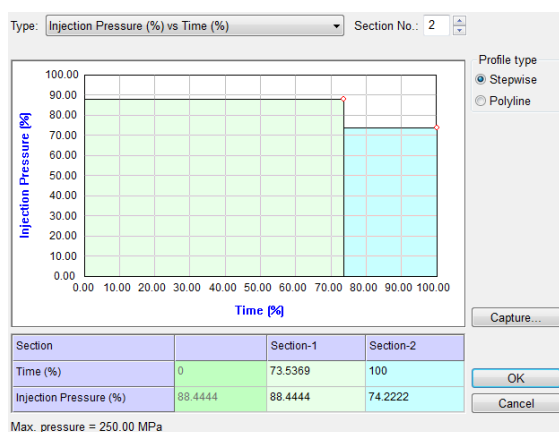
| № | Параметры | Уровни | |
|---|-----------------------------------|--------|-----|
| | | 1 | 2 |
| 1 | Температура впрыска расплава (°С) | 380 | 400 |
| 2 | Температура пресс-формы (°С) | 180 | 220 |
| 3 | Давление впрыска (МПа) | 180 | 220 |

Продолжение таблицы 4.2

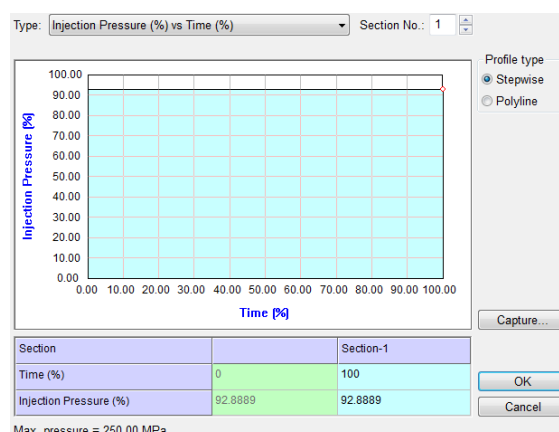
| | | | |
|---|-------------------------------------|------|------|
| 4 | Давление подпрессовки (МПа) | 54 | 176 |
| 5 | Профиль давления впрыска | 1 | 2 |
| 6 | Время заполнения (сек.) | 0,03 | 0,05 |
| 7 | Время выдержки под давлением (сек.) | 2 | 4 |
| 8 | Количество точек подвода расплава | 1 | 2 |

Профили давления представлены на рисунке 4.16. Для задания профиля «1» на 100% времени процентная составляющая давления задавалась в пределах от 90 до 95%, для профиля «2» – на промежутке времени от 70 до 75% давление задавалось в пределах от 85 до 90 %, на остальном промежутке поднималось до 70 – 75%.

Для каждого параметра были рассчитаны средние значения и величина дельты. Результаты расчета представлены в таблице 4.3.



а)



б)

Рисунок 4.16 – Профили давления при задании параметров имитационного моделирования:

(а) – профиль давления «2», б) – профиль давления «1»

Таблица 4.3 – Средние значения параметров инжекционного литья и значение дельты

| Параметр инжекционного литья | Среднее значение параметра | Дельта |
|-----------------------------------|----------------------------|--------|
| Температура впрыска расплава | 390 | 10 |
| Температура пресс-формы | 200 | 20 |
| Давление впрыска | 200 | 20 |
| Давление подпрессовки | 115 | 61 |
| Профиль давления впрыска | 1,5 | 0,5 |
| Время выдержки под давлением | 0,04 | 0,01 |
| Время цикла | 3 | 1 |
| Количество точек подвода расплава | 1,5 | 0,5 |

В таблице 4.4 представлен план экспериментов 2^8 для восьми двухуровневых факторов.

Таблица 4.4 – План экспериментов в кодовых обозначениях

| Факторы | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 4 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| 5 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 |
| 6 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| 7 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 8 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| 9 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 |
| 10 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 11 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 12 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 |

Используя матрицу эксперимента, средние значения и дельты параметров инжекционного литья составляется план экспериментов, представленный в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Полученный план экспериментов:

| Присвоенный номер эксперимента | Факторы | Температура впрыска | Температура пресс-формы | Давление впрыска | Давление подпрессовки | Профиль давления впрыска | Время выдержки под давлением | Время цикла | Количество точек подвода расплава |
|--------------------------------|---------|---------------------|-------------------------|------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------------|-------------|-----------------------------------|
| 7 | 1 | 380 | 180 | 180 | 54 | 1 | 0,0300 0 | 2 | 1 |
| 1 | 2 | 380 | 180 | 180 | 54 | 1 | 0,0500 0 | 4 | 2 |
| 8 | 3 | 380 | 180 | 220 | 176 | 2 | 0,0300 0 | 2 | 1 |
| 2 | 4 | 380 | 220 | 180 | 176 | 2 | 0,0300 0 | 4 | 2 |
| 3 | 5 | 380 | 220 | 220 | 54 | 2 | 0,0500 0 | 2 | 2 |
| 9 | 6 | 380 | 220 | 220 | 176 | 1 | 0,0500 0 | 4 | 1 |
| 4 | 7 | 400 | 180 | 220 | 176 | 1 | 0,0300 0 | 4 | 2 |
| 10 | 8 | 400 | 180 | 220 | 54 | 2 | 0,0500 0 | 4 | 1 |
| 5 | 9 | 400 | 180 | 180 | 176 | 2 | 0,0500 0 | 2 | 2 |
| 6 | 10 | 400 | 220 | 220 | 54 | 1 | 0,0300 0 | 2 | 2 |
| 11 | 11 | 400 | 220 | 180 | 176 | 1 | 0,0500 0 | 2 | 1 |
| 12 | 12 | 400 | 220 | 180 | 54 | 2 | 0,0300 0 | 4 | 1 |

4.2 РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИНЖЕКЦИОННОГО ЛИТЬЯ

Для определения оптимальных параметров инжекционного литья детали «Шестерня» было проведено 12 экспериментов численного имитационного моделирования с использованием программного продукта Moldex3D [90].

Для оценки качества полученных в результате численного имитационного моделирования отливок использовались следующие параметры сравнения:

1. *Полное результирующее смещение* – показывает длину полного вектора смещения (учитываются все эффекты) после того, как деталь выталкивается и охлаждается до комнатной температуры. Для оценки данного параметра рассчитывался размах значений (4.1) и относительная погрешность (4.2), также оценивалась разность значений в диаметрально расположенных точках: в местах подвода расплава (Δ_1) и свободных от точек подвода поверхностей (Δ_2) (схема точек, в которых проводятся измерения, представлена на рисунке 4.17), а также проводился анализ гистограмм. Для обеспечения точности изготовления изделия гистограмма должна быть близка к гладкой кривой и не иметь провалов, которые идентифицируют неравномерность усадки по зонам отливки. Сравнение гистограмм проводилось с использованием метода Box plot. Результаты имитационного моделирования представлены в Приложении А. Результаты расчета параметра представлены в таблице 4.6. На рисунке 4.18 представлено сравнение гистограмм параметра с использованием методики Box plot.

$$R = y_{\max} - y_{\min}, \quad (4.1)$$

где R – размах значений параметра оценки качества, полученных в результате численного имитационного моделирования отливок;

y_{\max} – максимальное значение параметра оценки качества;

y_{\min} – минимальное значение параметра оценки качества.

$$\delta = \frac{R}{y_{cp}}, \quad (4.2)$$

где δ – относительная погрешность значений параметра оценки качества, полученных в результате численного имитационного моделирования отливок;

R – размах значений параметра оценки качества, полученных в результате численного имитационного моделирования отливок;

y_{cp} – среднее значение параметра оценки качества по отливке.

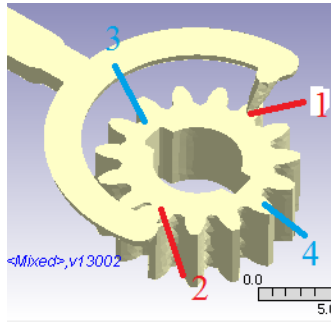


Рисунок 4.17 - Схема точек, в которых проводятся измерения значений параметров
оценки качества ($\Delta_1=|y_1-y_2|$; $\Delta_2=|y_3-y_4|$)

Таблица 4.6 – Оценка параметра «Полное результирующее смещение»

| Номер эксперимента | Размах (R) | Относительная погрешность (δ) | Δ_1 | Δ_2 |
|--------------------|------------|--|------------|------------|
| 1 | 0,09 | 1,7272 | 0,0031 | 0,0494 |
| 2 | 0,0861 | 1,6533 | 0,0099 | 0,0654 |
| 3 | 0,081 | 2,2362 | 0,0185 | 0,0604 |
| 4 | 0,077 | 1,5742 | 0,0134 | 0,0645 |
| 5 | 0,084 | 1,5048 | 0,0271 | 0,0524 |
| 6 | 0,084 | 1,6356 | 0,0026 | 0,074 |
| 7 | 0,1215 | 1,6793 | 0,0104 | 0,0137 |
| 8 | 0,1025 | 1,5259 | 0,0678 | 0,0241 |
| 9 | 0,1145 | 1,3596 | 0,0736 | 0,0249 |
| 10 | 0,1135 | 1,3302 | 0,0739 | 0,0355 |
| 11 | 0,1355 | 1,4814 | 0,0771 | 0,0263 |
| 12 | 0,1125 | 1,4216 | 0,0642 | 0,0238 |

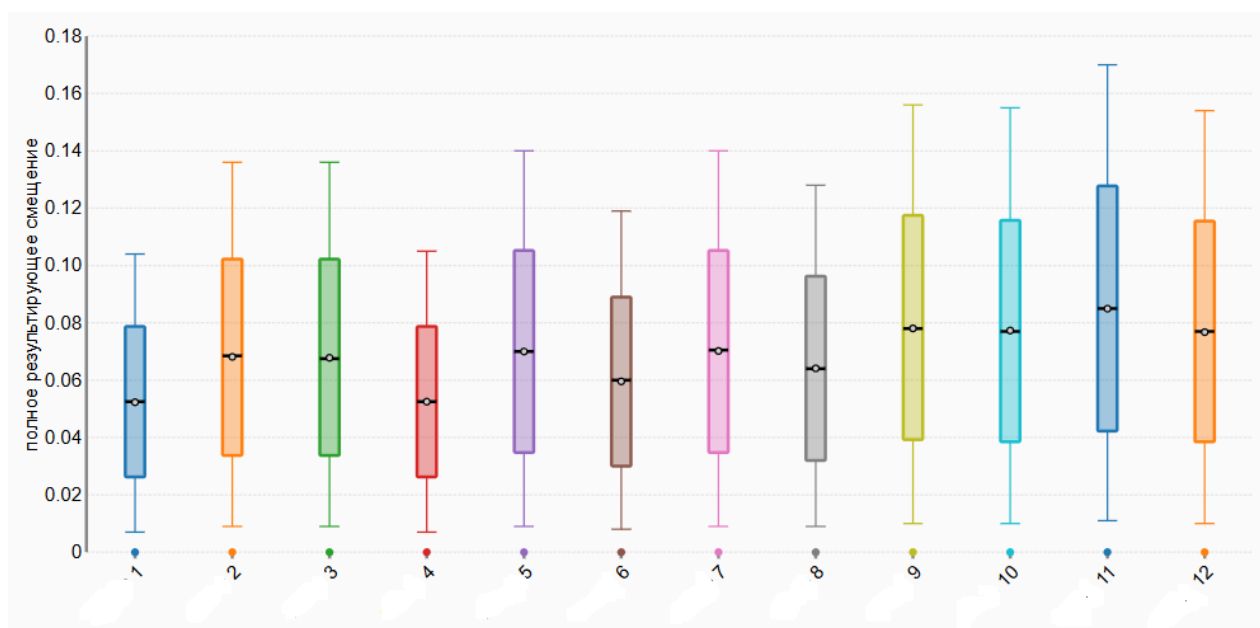


Рисунок 4.18 – Сравнение гистограмм параметра «Полное результирующее смещение» с использованием метода Box plot

2. *Максимальное значение остаточных термических напряжений по Мизесу.* Для оценки данного параметра необходимо определить максимальное значение по отливке. Чтобы обеспечить качество получаемой отливки необходимо, чтобы максимальное значение параметра стремилось к минимуму. Результаты имитационного моделирования представлены в Приложении Б. Результаты расчета представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Оценка параметра «Максимальное значение остаточных термических напряжений по Мизесу»

| | | | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| <i>Номер эксперимента</i> | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| <i>Максимальное значение</i> | 432,45 | 534,36 | 549,93 | 525,55 | 592,75 | 577,66 |
| <i>Номер эксперимента</i> | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| <i>Максимальное значение</i> | 274,98 | 241,93 | 284,21 | 318,64 | 319,72 | 383,84 |

3. Общий эффект влияния ориентации волокон на коробление – показывает длину вектора смещения эффекта ориентации волокна. Деформация эффекта ориентации волокна определяется как разница между следующими двумя деформациями: (1) окончательная деформация из-за всех факторов. (2) деформация должная к случайной ориентации волокна. В ней представлен анизотропный эффект ориентации волокон. Для оценки данного параметра необходимо определить максимальное значение по отливке и оценить равномерность гистограмм. Чтобы обеспечить качество получаемой отливки необходимо, чтобы максимальное значение параметра «Общий эффект влияния ориентации волокон на коробление» стремилось к минимуму, а гистограмма должна быть близка к гладкой кривой и не иметь провалов. Результаты имитационного моделирования представлены в Приложении В. Сравнение гистограмм по методу Box plot представлено на рисунке 4.19. Результаты расчета параметра представлены в таблице 4.8.

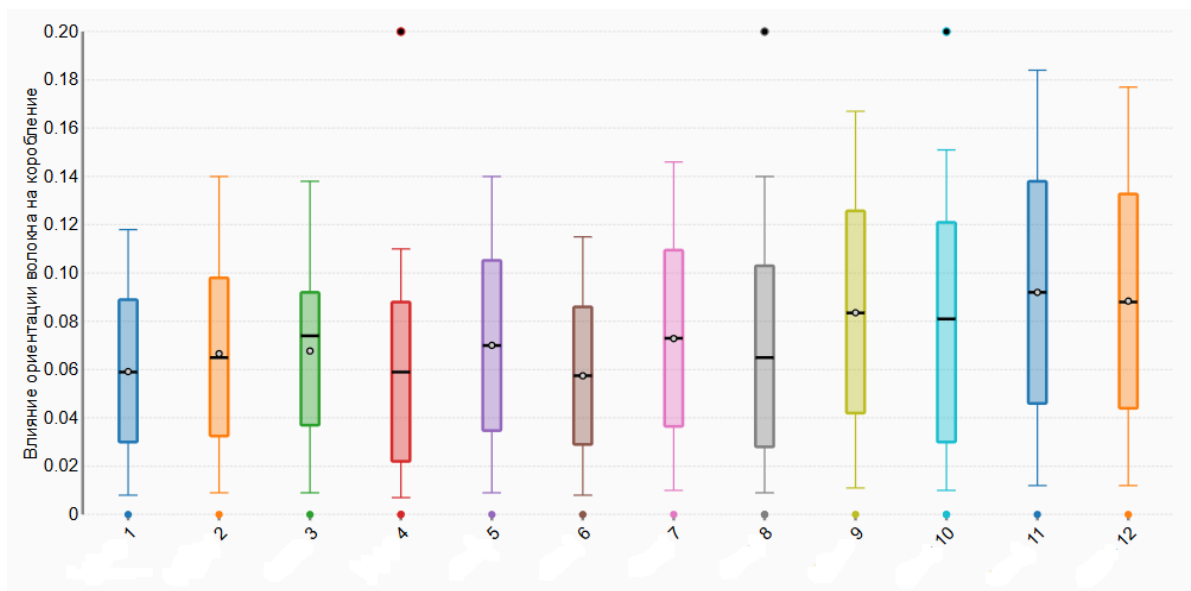


Рисунок 4.19 – Сравнение гистограмм параметра «Общий эффект влияния ориентации волокон на коробление» с использованием метода Box plot

Таблица 4.8 – Оценка параметра «Общий эффект влияния ориентации волокон на коробление»

| Номер эксперимента | Максимальное значение |
|--------------------|-----------------------|
| 1 | 0,1066 |
| 2 | 0,1267 |
| 3 | 0,1055 |
| 4 | 0,1013 |
| 5 | 0,1038 |
| 6 | 0,1025 |
| 7 | 0,1439 |
| 8 | 0,1351 |
| 9 | 0,165 |
| 10 | 0,148 |
| 11 | 0,1815 |
| 12 | 0,1538 |

4. Объемная усадка – это параметр усадки материала по объёму (обычно выражается в процентах), который показывает, насколько уменьшается объём материала при его охлаждении, отверждении, сушке или иных процессах фазовых или структурных изменений. Неравномерная объемная усадка приведет к искривлению и искажению формованных деталей. Для оценки данного параметра рассчитывается размах значений (4.1) и относительная погрешность (4.2), а также проводится анализ гистограмм. Для обеспечения точности изготовления изделия гистограмма должна быть близка к гладкой кривой и не иметь провалов, которые идентифицируют неравномерность усадки по зонам отливки. Результаты имитационного моделирования представлены в Приложении Г. Результаты расчёта параметра представлены в таблице 4.9.

5.

Таблица 4.9 – Оценка параметра «Объемная усадка»

| Номер эксперимента | размах | Относительная погрешность |
|--------------------|--------|---------------------------|
| 1 | 0,5125 | 0,1874 |
| 2 | 0,1529 | 0,0516 |
| 3 | 0,501 | 0,1807 |

Продолжение таблицы 4.9

| | | |
|----|--------|--------|
| 4 | 0,2395 | 0,0883 |
| 5 | 0,572 | 0,1997 |
| 6 | 0,449 | 0,1555 |
| 7 | 0,685 | 0,2695 |
| 8 | 0,643 | 0,2731 |
| 9 | 0,632 | 0,2068 |
| 10 | 0,35 | 0,1222 |
| 11 | 0,7625 | 0,2345 |
| 12 | 0,2915 | 0,1005 |

5. Air Trap – образование воздушных пузырьков. При грамотно спроектированной пресс-формы образование воздушных пузырьков будет минимальным. Результаты имитационного моделирования представлены в Приложении Д.

4.3 GREY RELATIONAL АНАЛИЗ

Теория серых систем была предложена профессором Deng [73] для исследования систем с недостаточным содержанием информации. Серой называется такая система, которая частично известна и частично неизвестна (с неполным описанием) [73 – 74]. В теории серых систем серый реляционный анализ улавливает отношения между главным фактором и другими вспомогательными факторами в исследуемой системе. В процессе сравнения эталонная последовательность соотносится со сравниваемыми последовательностями, которые показывают некоторую степень сходства с эталонной моделью и, таким образом, определяется лучшая из них.

Очевидно, что относительная погрешность смещения, относительная погрешность объемной усадки и максимальные значения термических остаточных напряжений по фон-Мизесу по 12 экспериментам должны быть минимальны. Поскольку в этом случае анализ «меньше – лучше» по Тагучи для обозначенных характеристик качества неприменим в силу их разнонаправленности, то был использован grey relational анализ. Grey relational анализ – это метод измерения в

теории серой (grey) системы, который анализирует степень (degree) и уровень отношения разнородных параметров для их дискретной последовательности.

Исходные экспериментальные данные сначала нормировались в диапазоне от 0 до 1 в соответствии с принципом «меньше – лучше» для величины коробления по зависимости (4.3):

$$x_{ij} = \frac{y_{ij} - \min_j y_{ij}}{\max_j y_{ij} - \min_j y_{ij}}, \quad (4.3)$$

$y_{ij} = \max_n y_{ij}^n$ – наиболее негативная характеристика качества (максимальные значения по каждому параметру) среди $n=1\dots 12$ рассматриваемых параметров инжекционного литья. Наилучший нормированный результат соответствует значению 1.

Grey relational коэффициент ξ_{ij} , который рассчитывается, для определения соотношения между идеальным и фактическим экспериментальными результатами может быть выражен как:

$$\xi_{ij} = \frac{\min_i \min_j |x_i^0 - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|}{|x_i^0 - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|}, \quad (4.4)$$

где x_i^0 - это идеальный результат (т.е. лучший нормализованный результат =1) для i - характеристики качества, $\zeta = [0,1]$ - (distinguishing) коэффициент отличия, целью которого является ослабление эффекта $\max_i \max_j |x_i^0 - x_{ij}|$, когда он становится слишком большим и, следовательно, увеличивает разницу значимости grey relational коэффициента. В общем, его значение принимается равным 0,5, если все параметры процесса имеют равный вес.

В Приложении Е представлены grey relational коэффициенты для каждого эксперимента ортогональной матрицы L12. После получения grey relational коэффициентов ξ_{ij} далее используется метод весовых коэффициентов для интеграции полученных значений grey relational коэффициентов для каждого эксперимента в интегрированную реляционную оценку. Общая оценка множественных характеристик качества основана на интегрированной реляционной оценке, которая определяется по зависимости (4.5):

$$\gamma_j = \sum_{i=1}^m \frac{l_i}{\sum_{i=1}^m l_i} \xi_{ij}, \quad (4.5)$$

где l_i - уровень значимости i -ой характеристики качества.

Результирующие интегрированные реляционные оценки также приведены в Приложении Е. Чем выше интегрированная реляционная оценка, тем лучше результат эксперимента, тем он ближе к идеально нормированному значению.

В Приложении Е y_1, y_2, y_3, y_4 – относительная погрешность смещения, максимальное значение термальных остаточных напряжений по фон – Мизесу, относительная погрешность объемной усадки, максимальное значение смещения ориентации волокна, взятые по 12 экспериментам, x_1, x_2, x_3, x_4 – нормированные по зависимости (1) факторы.

Значения реляционных оценок ξ_i рассчитывались по зависимости (2) относительно вектора желательных нормированных параметров качества $x_i^0 = (1,1,1,1)$, который соответствует максимальным полученным во всех численных экспериментах параметрам качества. Интегральная реляционная оценка γ определялась по формуле (3.5), при этом для относительной погрешности смещения в 12 экспериментах (x_{1j}) было принято $l_1 = 40\%$, для максимального значения термических остаточных напряжений по фон – Мизесу в 12 экспериментах (x_{2j}) – $l_2 = 5\%$, для относительной погрешности объемной усадки (x_{3j}) – $l_3 = 25\%$, для максимального значения смещения ориентации волокна (x_{4j}) – $l_4 = 30\%$.

Результаты расчета интегральной реляционной оценки представлены в Приложении Е, сравнение интегральных оценок для 12 экспериментов представлено на рисунке 4.20. По рассчитанным значениям видно, что максимальное значение интегральной реляционной оценки (0,7668) имеет четвертый эксперимент. Эти значения факторов наилучшим образом соответствуют вектору желательности параметров качества.

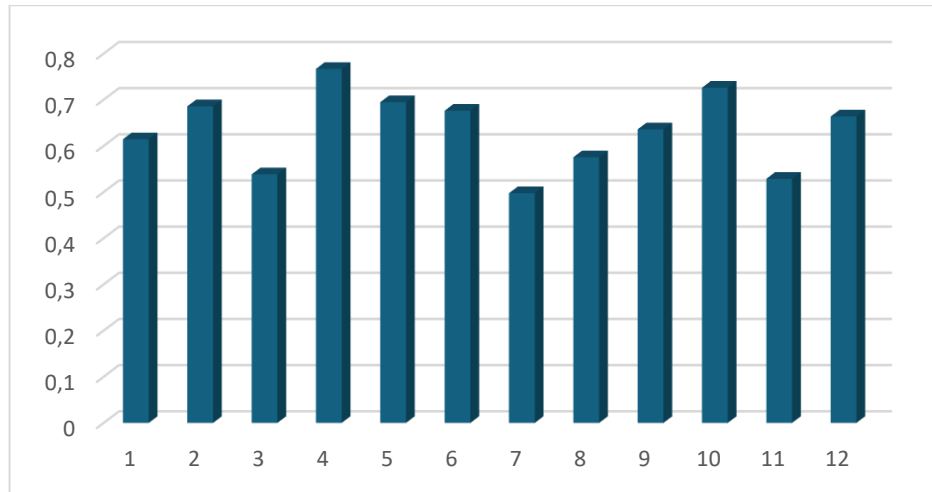


Рисунок 4.20 – Сравнение интегральных реляционных оценок

По результатам grey relational анализа отливка наилучшего качества получается при следующих параметрах инъекционного литья: температура впрыска – 385 °С, температура пресс-формы – 200 °С, давление впрыска – 250 МПа, давление подпрессовки – 240 МПа, время выдержки под давлением – 0,06 с, время цикла – 5 с, две точки подвода расплава, профиль давления впрыска равномерный (около 90%).

4.4 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АРМИРОВАННОЙ И НЕАРМИРОВАННОЙ ОТЛИВКИ

На следующем этапе было проведено сравнительный анализ армированной и неармированной отливки шестерни, который позволил оценить необходимость армирования. Для этого была просчитана отливка шестерни без закладного армирующего элемента, параметры инъекционного литья были выбраны аналогично режиму №4 (наилучший режим): температура впрыска – 385 °С, температура пресс-формы – 200 °С, давление впрыска – 250 МПа, давление подпрессовки – 240 МПа, время выдержки под давлением – 0,06 с, время цикла – 5 с, две точки подвода расплава, профиль давления впрыска равномерный (около 90%). Результаты имитационного моделирования представлены в Приложении Ж.

Для аналитического сравнения качества отливки шестерни, армированной закладным элементом, полученной на наилучшем из режимов (эксперимент №4), и

отливки шестерни, без армирующего элемента, полученной при тех же параметрах инжекционного литья, использовался grey relational анализ. Результаты данного анализа представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Результаты grey relational анализа

| | армированная закладным элементом шестерня | шестерня без закладного элемента) |
|----------|---|---|
| y_1 | 1,5742 | 1,7374 |
| y_2 | 525,55 | 553,493 |
| y_3 | 0,0883 | 0,2374 |
| y_4 | 0,1013 | 0,0796 |
| x_1 | 0 | 1 |
| x_2 | 0 | 1 |
| x_3 | 0 | 1 |
| x_4 | 1 | 0 |
| ξ_1 | 1 | 0,333 |
| ξ_2 | 1 | 0,333 |
| ξ_3 | 1 | 0,333 |
| ξ_4 | 0,333 | 1 |
| γ | 0,8 | 0,533 |

По результатам grey relational анализа отливка наилучшего качества получается при ее армировании закладным элементом.

4.5 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

В результате исследования была проведена комплексная апробация разработанной методики управления качеством на примере высокоточного изделия – шестерня из полимерного композиционного материала (РЕЕК) с армирующим элементом.

Решена задача многокритериальной оптимизации восьми технологических параметров инжекционного литья (температура, давление, время, профиль

давления, количество точек впуска) с использованием планирования экспериментов по методу Тагучи (ортогональная матрица L_{12}), имитационного моделирования в САЕ-системе Moldex3D и серого реляционного анализа (GRA) для интегральной оценки разнонаправленных выходных параметров качества (смещение, остаточные напряжения, усадка, ориентация волокна).

Определён оптимальный режим литья (Эксперимент №4), обеспечивающий наилучшее качество отливки. Установлено, что ключевыми факторами являются: использование двух точек подвода расплава, повышенное давление подпрессовки и равномерный профиль давления впрыска.

Проведён сравнительный анализ армированной и неармированной отливки при идентичных оптимальных параметрах процесса. Grey relational анализ показал, что интегральная оценка качества армированной отливки (0.8) существенно превышает показатель неармированной (0.533). Это количественно доказывает высокую эффективность гибридной технологии (инжекционное литье + закладной армирующий элемент, изготовленный методом селективного лазерного сплавления) для обеспечения повышенной точности и минимизации коробления ответственных деталей.

Подтверждена практическая значимость разработанного регламента КТПШ: комплексное применение цифрового моделирования, планирования экспериментов и многокритериальной оптимизации позволило в виртуальной среде определить оптимальную конструкцию оснастки и технологические параметры, избежав многочисленных дорогостоящих итераций физических экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении представлены основные результаты и выводы диссертационной работы.

Все поставленные задачи успешно решены и цель исследования достигнута. В заключении представлены основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Проведен теоретический анализ существующих подходов к обеспечению показателей качества отливок, полученных методом инжекционного литья. Анализ показал фрагментарность существующих подходов к применению CAE-моделирования, отсутствие стандартизированных методик интеграции цифровых двойников в процесс КТПП и недостаточную разработку комплексных квалитетических параметров для оценки качества получаемых отливок при использовании результатов виртуального моделирования. Это обусловило необходимость создания единого методического аппарата.

2. Разработана методика применения метода QFD для построения ранжированной матрицы соответствия между потребительскими показателями качества и характеристиками процесса формообразования, которая позволяет эффективно определить приоритетные характеристики процесса, связанные с определенными потребителем характеристиками качества продукции, на примере изделий крышка тары и шестерня.

3. Разработана методика получения новых характеристик качества изделий по цифровой модели процесса инжекционного литья при имитационном моделировании процесса. Для этой цели определены интегральные характеристики качества формообразования специфичные для одноразовых изделий - типа крышка тары, и высокоточных – типа шестерня. Характеристики позволяют перейти от анализа распределённых полевых параметров (температура, напряжение, усадка) к интегральным количественным показателям, что даёт возможность принимать обоснованные технологические решения на этапе проектирования. Для деталей типа «Крышка тары» предложен комплекс 8 характеристик, включающий оценку

равномерности охлаждения, средней скорости охлаждения, коэффициента искажения геометрии, неплоскостности и теплосъёма. Для деталей типа «шестерня» из ПКМ определено 6 ключевых характеристик.

4. Разработан инструментарий многокритериальной оптимизации параметров инжекционного литья по цифровой модели на основе робастного планирования экспериментов Тагучи и серого реляционного анализа интегральных характеристик качества процесса формообразования. Он обеспечивает выбор оптимальных технологических параметров литья и рациональной конструкции пресс-формы (системы подвод расплава и охлаждения) на примерах изделий «крышка тары» и «шестерня».

Практическое применение инструментария на примере тонкостенной детали «крышка тары» подтвердило преимущество конформной системы охлаждения, выполненной аддитивными технологиями, перед традиционной (сверленной): коробление и неплоскостность снижены почти в 2 раза.

Для детали «шестерня» успешно решена задача многокритериальной оптимизации 8 технологических параметров. Серый реляционный анализ выявил оптимальный режим литья и доказал эффективность армирования закладным элементом: интегральная оценка качества армированной отливки (0,8) существенно превысила показатель неармированной (0,533).

5. Разработана и практически реализована методика конструкторско-технологической подготовки производства изделий из полимерных материалов методом инжекционного литья. Она интегрирует современные методы CAE-моделирования, статистическое планирование экспериментов (Тагучи) и многокритериальную оптимизацию (серый реляционный анализ).

Ключевой элемент – замена дорогостоящих физических итераций виртуальными, что исключает доводку пресс-форм (обычно 2–3 итерации). В результате трудоемкость подготовки сокращается в среднем на 15%, а время вывода продукта на рынок – соответственно.

Перспективы дальнейшей разработки темы: проведённое исследование закладывает основу для дальнейшей интеллектуализации и цифровизации

процесса подготовки производства. Перспективным направлением является разработка самообучающихся «цифровых двойников» и нейросетевых моделей для мгновенного прогнозирования оптимальных режимов литья. Кроме того, требуется углублённое исследование гибридных технологий, включая комплексное моделирование аддитивного изготовления оснастки и последующего литья. Важным шагом станет создание стандартизированных отраслевых регламентов для сквозного проектирования, а также расширение методики на новые материалы, такие как биополимеры и smart-композиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Освальд, Т. Литье пластмасс под давлением / Т. Освальд, Л.-Ш. Тунг, П. Дж. Грэмман. – СПб.: ИП, 2006.
2. Барвинский, И. Компьютерный анализ литья: Подходы и модели / И. Барвинский, И. Барвинская // Пластикс. – 2009. – № 3. – С. 50–54.
3. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication: white paper / M. Grieves. – Electronic text data. – Moose Lake: Michael W. Grieves, LLC, 2014.
4. Яблочников, Е. И. Современное применение аддитивных технологий и систем виртуального моделирования / Е. И. Яблочников, А. В. Пирогов, А. А. Грибовский // Изв. вузов. Приборостроение. – 2014. – Т. 57, № 5. – С. 72–76
5. Chen W. C. и др. An integrated parameter optimization system for MISO plastic injection molding // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2009. – Vol. 44, iss. 5-6. – P. 501–511
6. Ковалькова, Е. А. Разработка системы оценки качества технологических процессов инжекционного литья / Е. А. Ковалькова, И. Н. Хаймович // Известия Самарского научного центра РАН. – 2017. – Т. 19, № 1-3. – С. 489–493
7. Michaeli D. O. Injection Mold Design Engineering / D. O. Michaeli. – Munich : Hanser Publishers, 2007
8. Рыбаков А. В. и др. Автоматизация процесса проектирования и изготовления оснастки // CAD/CAM/CAE Observer. – 2012. – № 5 (73). – С. 56–62
9. Прокофьев, Г. И. Перспективы развития процессов проектирования и технологической подготовки производства // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2009. – № 9. – С. 45–59
10. Конструирование пластмассовых изделий для литья под давлением / пер. с англ.; под ред. В. А. Брагинского, Е. С. Цобкалло, Г. В. Комарова. – СПб.: Профессия, 2006. – 512 с.: ил.
11. Сайт Chen Hsong [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://chenhsong.ru>
12. Garvin D. A. What Does "Product Quality" Really Mean? // Sloan Management Review. – 1984. – Fall. – P. 25–43

13. Леон Р. и др. Управление качеством. Робастное проектирование. Метод Тагучи: пер. с англ. / Р. Леон, А. Шумейкер, Р. Какар [и др.]. – М.: СЭЙФИ, 2002. – 384 с.
14. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 01.01.1980
15. Бортников, В. Г. Производство изделий из пластических масс: учеб. пособие для вузов: в 3 т. Т. 3: Проектирование и расчет технологической оснастки / В. Г. Бортников. – Казань: Дом печати, 2004
16. Шарашкина, Т. П. Статистические методы управления качеством: учеб. пособие / Т.П. Шарашкина. – Саранск: [б. и.], 2019. – 88 с.
17. Арбатов, И. А. Инструменты менеджмента и качества: учеб. пособие / И.А. Арбатов. – СПб.: ГУАП, 2020. – 238 с.
18. Greer V. A. Audit of quality management system as one of the most / V.A. Greer // Production Journal of Social Sciences. – 2021. – № 1. – P. 225–227.
19. Шарашкина, Т. П. Средства и методы управления качеством: учеб. пособие / Т.П. Шарашкина. – Саранск: [б. и.], 2018. – 116 с.
20. Ефимов, В. В. Средства и методы управления качеством: учеб. пособие / В. В. Ефимов. – М.: КНОРУС, 2021. – 69 с.
21. Окрепилов, В.В. Применение методов всеобщего управления качеством / В.В. Окрепилов. – СПб.: Наука, 2019. – 325 с.
22. Ефимов, В. В. Статистические методы в управлении качеством продукции: учеб. пособие / В. В. Ефимов, Т. В. Барт. – 2-е изд. – М.: КноРус, 2013. – 240 с.
23. Criteria for Performance Excellence // The Malcolm Baldrige National Quality Award Program / National Institute of Standards and Technology. – 2003. – P. 57.
24. Кане, М. М. Системы, методы и инструменты менеджмента качества / М. М. Кане. – СПб.: Питер, 2020. – 576 с.
25. Трутнева, С. Ю. Технология и оборудование для приготовления изделий из пластмасс и резин / С. Ю. Трутнева // Научно-методический электронный журнал Концепт. – 2020. – № 10. – С. 21–25.

26. Хаймович, И. Н. Автоматизация проектирования объектов заготовительно-штамповочного производства компрессорных лопаток авиационных двигателей / И. Н. Хаймович // Известия вузов. Авиационная техника. – 2014. – № 2. – С. 44–48.
27. Хаймович, И. Н. Исследование процесса заполнения пресс-формы при инжекционном литье лопаток из композиционных материалов / И. Н. Хаймович, И. С. Степаненко // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 7. – С. 293–297.
28. Хаймович, И. Н. Метод определения базовых элементов в стандартах менеджмента качества машиностроительных производств / И. Н. Хаймович, Е. А. Ковалькова // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 10-2. – С. 349–353
29. Бихлер, М. Дефекты литьевых деталей и способы их устранения // Полимерные материалы. – 2007. – № 10. – С. 42–45
30. ГОСТ 27358-87. Пресс-формы для изготовления изделий из пластмасс. Общие технические условия. – Введ. 01.07.88
31. ОСТ 1 80063-73. Детали из пластмасс. Технические требования. – Введ. 01.01.1974
32. ГОСТ 25349-88. Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Поля допусков деталей из пластмасс. – Введ. 01.01.1990
33. ГОСТ 7713-62. Допуски и посадки. Основные определения
34. ГОСТ 11710-66. Допуски и посадки деталей из пластмасс. – Введ. 01.01.196
35. Grieves M. W. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication: white paper / M. W. Grieves. – Electronic text data. – Moose Lake: Michael W. Grieves, LLC, 2014. – 7 p.
36. Digital Twins for IoT Applications: A Comprehensive Approach to Implementing [Электронный ресурс] / Oracle. – Режим доступа: <http://www.oracle.com/us/solutions/internetofthings/digital-twins-for-iot-apps-wp-3491953.pdf>
37. Moldex3D RIM presentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://assets.fea.ru/uploads/moldex3d/presentations/Moldex3D_RIM_presentation_RUS_.pdf.

38. Барвинский, И. А. Компьютерный анализ литья термопластов: основы анализа течения (основные принципы анализа, оценка технологичности литьевых изделий и пресс-форм, анализ причин брака) : метод. материалы : в 2 ч. / И. А. Барвинский, И. Е. Барвинская. – М. : ЗАО «СиСофт», 2013. – 774 с.
39. Тадмор, З. Теоретические основы переработки полимеров / З. Тадмор, К. Гогос ; пер. с англ., под ред. Р. В. Торнера. – М. : Химия, 1984. – 632 с.
40. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – Введ. 01.10.2022
41. Планирование эксперимента [Электронный ресурс] / StatSoft. – Режим доступа: <http://statsoft.ru/home/textbook/modules/stexdes.html>
42. Бесшапошникова, В. И. Планирование и организация эксперимента в легкой промышленности: учеб. пособие для бакалавров / В. И. Бесшапошникова. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2017. – 224 с. – (Высшее образование: Бакалавриат). – ISBN 978-5-16-011782-9. – Текст: электронный // Znanium. – URL: <https://znanium.com/catalog/product/543099>
43. Rao S. An Overview of Taguchi Method: Evolution, Concept and Interdisciplinary Applications / S. Rao, P. Samant, A. Kadampatta, R. Shenoy // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2013. – Vol. 4, iss. 10. – P. 23-25
44. Phadke M. S. Quality Engineering Using Robust Design / M. S. Phadke. – Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall, 1989.
45. Karna S. K., Singh R. V., Sahai R. Application of Taguchi Method in Indian Industry. – 2012.
46. Боровиков, В. П. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере / В. П. Боровиков. – 2-е изд. – СПб. : Питер, 2003. – 700 с.
47. Davis C. S. Statistical Methods for the Analysis of Repeated Measurements / C. S. Davis. – New York : Springer, 2002
48. Wu C. H. Injection molding and injection compression molding of three-beam grating of DVD pickup lens / C. H. Wu, W. S. Chen // Sensors and Actuators A: Physical. – 2006. – Vol. 125, iss. 2. – P. 367–375.

49. Teng Y. Culture condition improvement for whole-cell lipase production in submerged fermentation by *Rhizopus chinensis* using statistical method / Y. Teng, Y. Xu // *Bioresource Technology*. – 2008. – Vol. 99, iss. 9. – P. 3900–3907
50. Aggarwal A. Optimizing power consumption for CNC turned parts using response surface methodology and Taguchi's technique – a comparative analysis / A. Aggarwal, H. Singh, P. Kumar, M. Singh // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2008. – Vol. 200, iss. 1–3. – P. 373–384
51. Kurt M. Application of Taguchi methods in the optimization of cutting parameters for surface finish and hole diameter accuracy in dry drilling processes / M. Kurt, E. Bagci, A. Kaynak // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2009. – Vol. 40, iss. 5–6. – P. 458–469
52. Altan M. Reducing shrinkage in injection moldings via the Taguchi ANOVA and neural network method / M. Altan // *Materials & Design*. – 2010. – Vol. 31, iss. 2. – P. 599–604
53. Zhai M. A study of gate location optimization of plastic injection molding using sequential linear programming / M. Zhai, Y. Xie // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2010. – Vol. 49, iss. 1–4. – P. 97–103
54. Ng C. F. Experimental investigation on the recycled HDPE and optimization of injection moulding process parameters via Taguchi method / C. F. Ng, S. Kamaruddin, A. N. Siddiquee, Z. A. Khan // *International Journal of Mechanics and Materials Engineering*. – 2011. – Vol. 6, iss. 1. – P. 81–91
55. Öktem H. Optimum process conditions on shrinkage of an injected-molded part of DVD-ROM cover using Taguchi robust method / H. Öktem // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2012. – Vol. 61, iss. 5–8. – P. 519–528
56. Wang X. Research on the reduction of sink mark and warpage of the molded part in rapid heat cycle molding process / X. Wang, G. Zhao, G. Wang // *Materials & Design*. – 2013. – Vol. 47. – P. 779–792
57. Shi F. Optimization of plastic injection molding process with soft computing / F. Shi, Z. L. Lou, J. G. Lu, Y. Q. Zhang // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2003. – Vol. 21, iss. 9. – P. 656–661

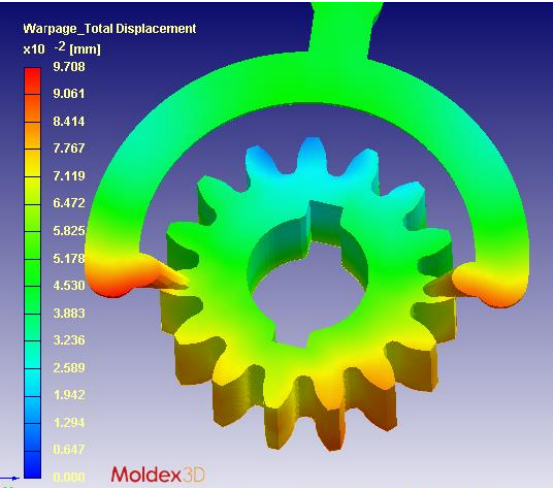
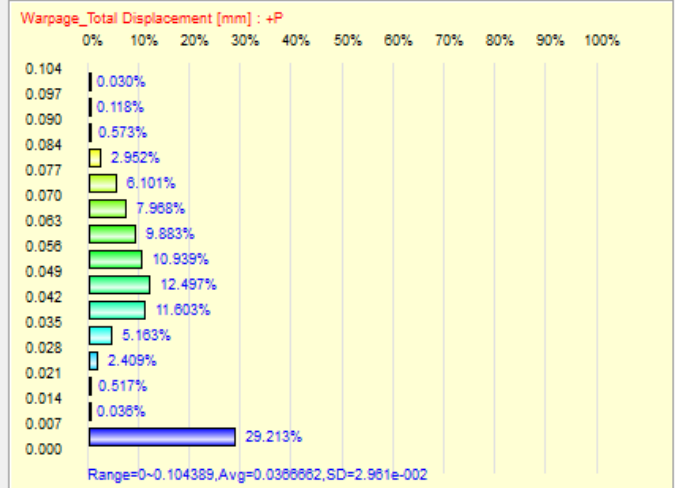
58. Yin F. A hybrid of back propagation neural network and genetic algorithm for optimization of injection molding process parameters / F. Yin, H. Mao, L. Hua // *Materials & Design*. – 2011. – Vol. 32, iss. 7. – P. 3457–3464
59. Ozcelik B. Comparison of the warpage optimization in the plastic injection molding using ANOVA, neural network model and genetic algorithm / B. Ozcelik, T. Erzurumlu // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2006. – Vol. 171, iss. 3. – P. 437–445
60. Akbarzadeh A. Parameter study in plastic injection molding process using statistical methods and IWO algorithm / A. Akbarzadeh, M. Sadeghi // *International Journal of Modeling and Optimization*. – 2011. – Vol. 1, iss. 2. – P. 141–145
61. Chen W. C. Optimization of process parameters using DOE, RSM and GA in plastic injection molding / W. C. Chen, D. Kurniawan, G. L. Fu // *Advanced Materials Research*. – 2012. – Vols. 472–475. – P. 1220–1223
62. Chen W. C. An integrated parameter optimization system for MISO plastic injection molding / W. C. Chen, M. W. Wang, C. T. Chen, G. L. Fu // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2009. – Vol. 44, iss. 5–6. – P. 501–511
63. Kurtaran H. Efficient warpage optimization of thin shell plastic parts using response surface methodology and genetic algorithm / H. Kurtaran, T. Erzurumlu // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2006. – Vol. 27, iss. 5–6. – P. 468–472
64. Park H. S. Optimization of conformal cooling channels with array of baffles for plastic injection mold / H. S. Park, X. P. Dang // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. – 2010. – Vol. 11, iss. 6. – P. 879–890
65. Sun B. Optimization of injection molding process parameters based on response surface methodology and genetic algorithms / B. Sun, Z. Wu, B. Gu, X. Huang // *Proceedings of the International Conference on Computer Engineering and Technology*. – 2010. – P. 397–400
66. Zhao P. Process parameter optimization of injection molding using a fast strip analysis as a surrogate model / P. Zhao, H. Zhou, Y. Li, D. Li // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2010. – Vol. 49, iss. 9–12. – P. 949–959

67. Xu G. Multi-objective optimization of MIMO plastic injection molding process conditions based on particle swarm optimization / G. Xu, Z. Yang, G. Long // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2012. – Vol. 58, iss. 5–8. – P. 521–531
68. Цветков, В. Я. Серый реляционный анализ // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2016. – № 12-1. – С. 166–166.
69. Chan W. K. Multi-criteria material selections and end-of-life product strategy: Grey relational analysis approach / W. K. Chan, T. K. L. Tong // *Materials & Design*. – 2007. – Vol. 28, iss. 5. – P. 1539–1546.
70. Theil H. The information approach to demand analysis // *Econometrica*. – 1965. – Vol. 33, iss. 1. – P. 67–87.
71. Пеньков, В. Е. Информационный подход: философские и методологические основания // *Гуманитарные и социально-экономические науки*. – 2008. – № 5. – С. 25–27
72. Tsvetkov V. Ya. Information Situation and Information Position as a Management Tool // *European Researcher. Series A*. – 2012. – Vol. 36, № 12-1. – P. 2166–2170
73. Deng J. L. Control problems of grey systems // *Systems and Control Letters*. – 1982. – Vol. 5. – P. 288–294.
74. Deng J. L. Introduction to grey system theory // *The Journal of Grey System*. – 1989. – Vol. 1. – P. 1–24.
75. Пичкалев, А. В. Обобщенная функция желательности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств // *Космонавтика*. – 2012. – № 1 (1). – С. 25–28
76. Прокофьев, Г. И. Перспективы развития процессов проектирования и технологической подготовки производства предприятий низких уровней зрелости // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. – 2009. – № 9. – С. 45–59.
77. Beaumont J. P. *Runner and Gating Design Handbook: Tools for Successful Injection Molding* / J. P. Beaumont. – 2nd ed. – Munich: Hanser, 2021
78. Баканов, М. И. Экономика и ее показатели: учеб. пособие для студентов / М. И. Баканов. – М.: Финансы и статистика, 2021. – 320 с.

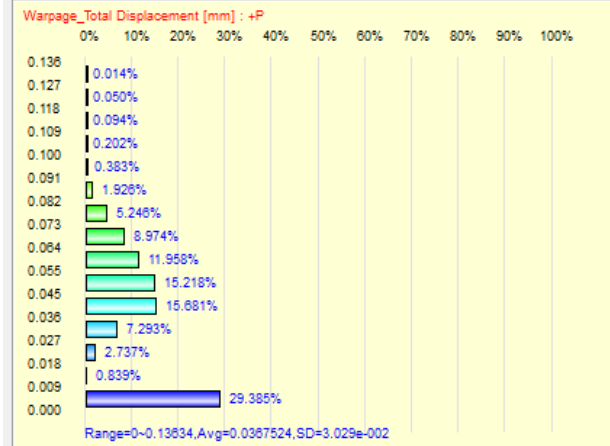
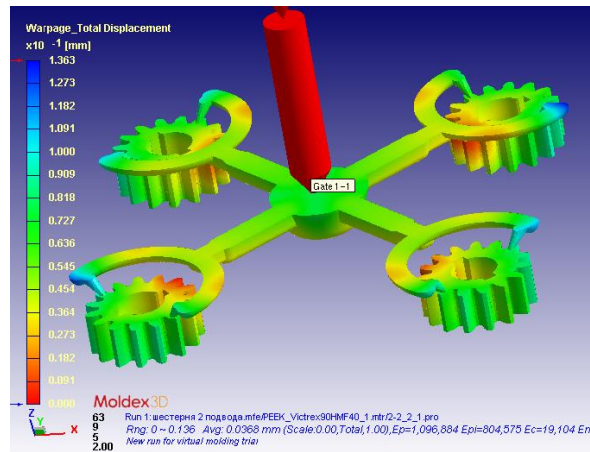
79. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 01.01.1980.
80. Вашуков, Ю. А. QFD: Разработка продукции и технологических процессов на основе требований и ожиданий потребителей: метод. указания / Ю. А. Вашуков, А. Я. Дмитриев, Т. А. Митрошкина. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012.
81. Галкина, Н.В. Разработка методики управления качеством отливок на этапе конструкторско-технологической подготовки производства литых изделий из полимерных материалов / Н.В. Галкина, А.И. Хаймович // Известия Тульского государственного университета. – 2026. – № 4. – 3-11 с.
82. Michaeli W. How to Make Injection Molds / W. Michaeli, G. Menges, P. Mohren. – 3-е изд. – Munich : Hanser Publishers, 2001. – 643 с.
83. Мэллой, Р. А. Конструирование пластмассовых изделий для литья под давлением / Р. А. Мэллой ; пер. с англ. ; под ред. В. А. Брагинского, Е. С. Цобкалло, Г. В. Комарова. – СПб. : Профессия, 2006. – 512 с.
84. Яблочников, Е. И. Применение систем виртуального моделирования при выборе и проектировании полимерных композиционных материалов / Е. И. Яблочников, В. А. Брагинский, А. С. Восоркин // Изв. вузов. Приборостроение. – 2012. – Т. 55, № 7. – С. 75–80.
85. Казанский, Н. Л. Оптимизация параметров инжекционного литья мультилинз из термопластичных полимеров / Н. Л. Казанский, И. С. Степаненко, А. И. Хаймович [и др.] // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 2. – С. 203–214.
86. Stepanenko I. S. GTE blade injection molding modeling and verification of models during process approbation / I. S. Stepanenko, A. I. Khaimovich // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 177, № 1. – Art. № 012093.
87. Хаймович, А.И. Оценка качества литья изделий из полимерных материалов на этапе конструкторско-технологической подготовки производства средствами САЕ-анализа / А.И. Хаймович, Н.В. Галкина // Известия Самарского научного центра РАН. – 2019. – Т. 21. № 1. – С. 91-97

88. Леон Р. Управление качеством. Робастное проектирование. Метод Тагучи : пер. с англ. / Р. Леон, А. Шумейкер, Г. Тагучи [и др.]. – М. : СЭЙФИ, 2002. – 384 с.
89. Ковалькова, Е. А. Разработка системы оценки качества технологических процессов инъекционного литья из полимерных композиционных материалов / Е. А. Ковалькова, И. Н. Хаймович // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. – Т. 19, № 1–3. – С. 489–493
90. Галкина, Н.В. Оптимизация технологических параметров инъекционного литья высокоточных полимерных деталей с использованием цифрового моделирования и серого реляционного анализа / Н.В. Галкина, А.И. Хаймович // Известия Самарского научного центра РАН. – 2026. – Т. 28. № 1. – С. 57-62

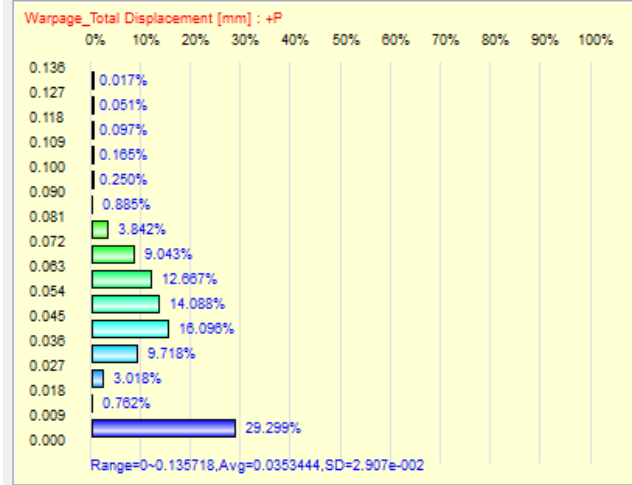
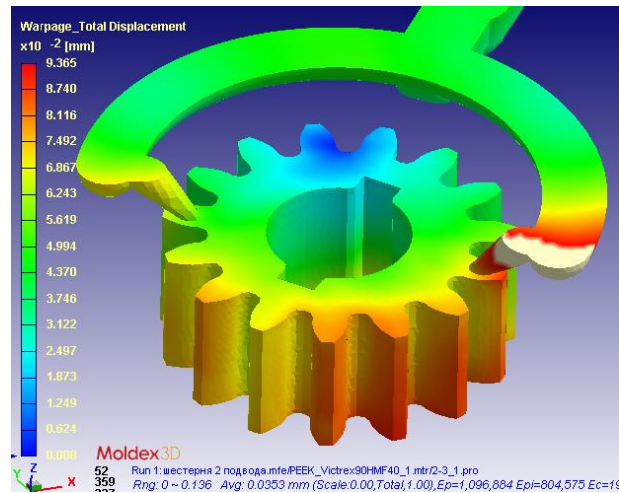
ПРИЛОЖЕНИЕ А
«РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПАРАМЕТР «ПОЛНОЕ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕЕ СМЕЩЕНИЕ»»

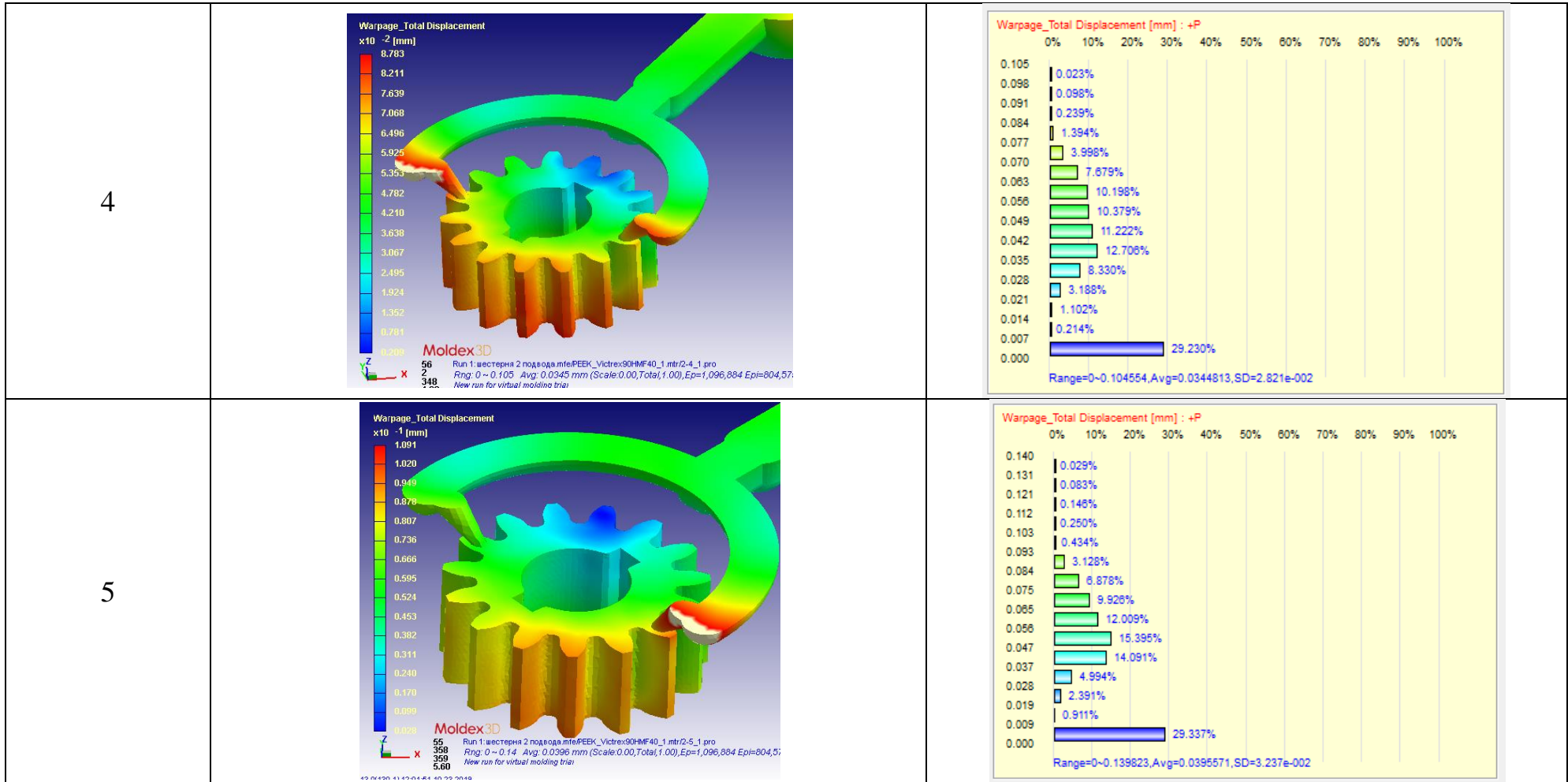
| Номер эксперимента | Графическое значение параметра | Гистограмма параметра | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|---|---|-------------------|------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|---------|-------|--|
| 1 |  <p>Warpage_Total Displacement x10⁻² [mm]</p> <p>Moldex3D</p> |  <p>Warpage_Total Displacement [mm] : +P</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Displacement [mm]</th> <th>Percentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.104</td><td>0.030%</td></tr> <tr><td>0.097</td><td>0.118%</td></tr> <tr><td>0.090</td><td>0.573%</td></tr> <tr><td>0.084</td><td>2.952%</td></tr> <tr><td>0.077</td><td>6.101%</td></tr> <tr><td>0.070</td><td>7.968%</td></tr> <tr><td>0.063</td><td>9.883%</td></tr> <tr><td>0.056</td><td>10.939%</td></tr> <tr><td>0.049</td><td>12.497%</td></tr> <tr><td>0.042</td><td>11.603%</td></tr> <tr><td>0.035</td><td>5.163%</td></tr> <tr><td>0.028</td><td>2.405%</td></tr> <tr><td>0.021</td><td>0.517%</td></tr> <tr><td>0.014</td><td>0.036%</td></tr> <tr><td>0.007</td><td>29.213%</td></tr> <tr><td>0.000</td><td></td></tr> </tbody> </table> <p>Range=0-0.104389, Avg=0.036662, SD=2.961e-002</p> | Displacement [mm] | Percentage | 0.104 | 0.030% | 0.097 | 0.118% | 0.090 | 0.573% | 0.084 | 2.952% | 0.077 | 6.101% | 0.070 | 7.968% | 0.063 | 9.883% | 0.056 | 10.939% | 0.049 | 12.497% | 0.042 | 11.603% | 0.035 | 5.163% | 0.028 | 2.405% | 0.021 | 0.517% | 0.014 | 0.036% | 0.007 | 29.213% | 0.000 | |
| Displacement [mm] | Percentage | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.104 | 0.030% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.097 | 0.118% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.090 | 0.573% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.084 | 2.952% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.077 | 6.101% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.070 | 7.968% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.063 | 9.883% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.056 | 10.939% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.049 | 12.497% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.042 | 11.603% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.035 | 5.163% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.028 | 2.405% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.021 | 0.517% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.014 | 0.036% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.007 | 29.213% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

2

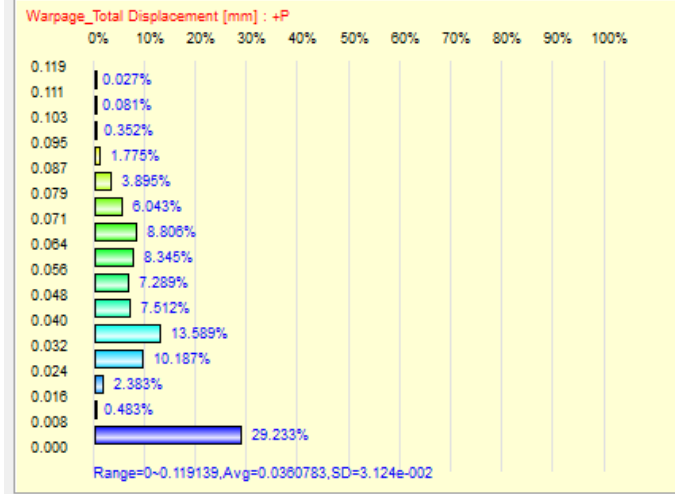
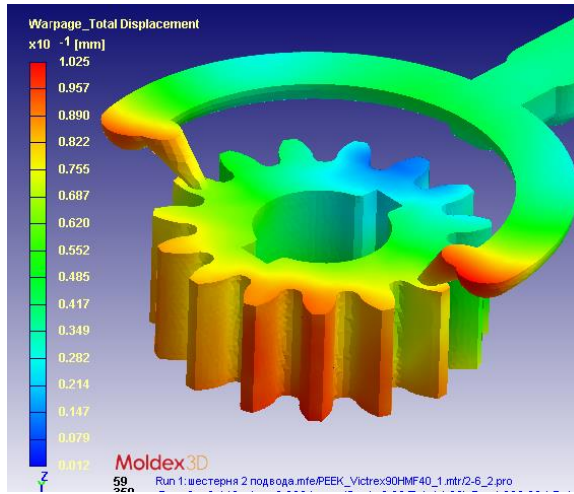


3

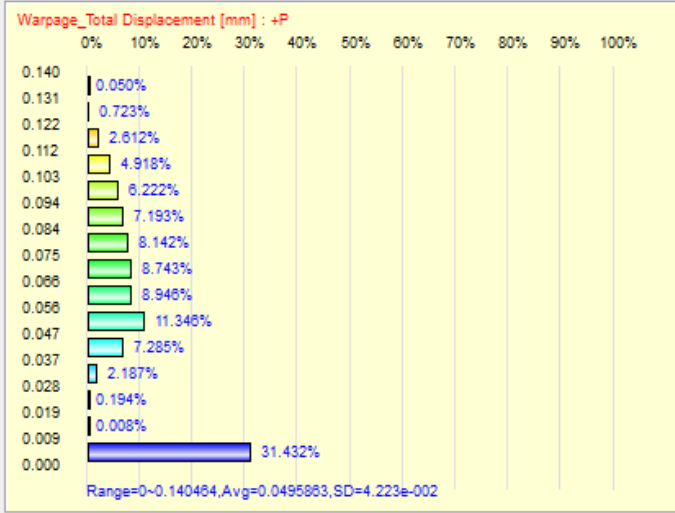
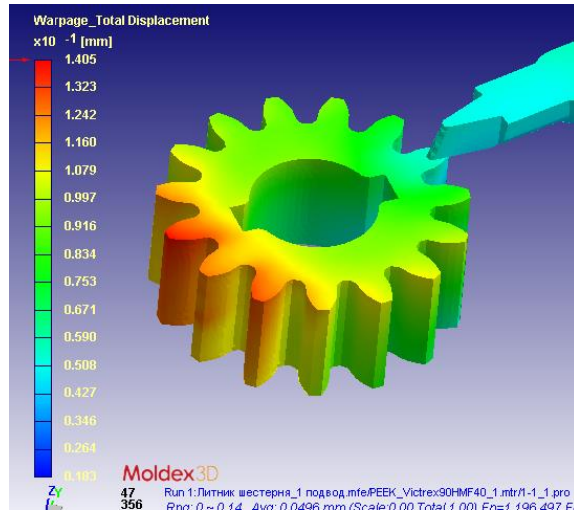




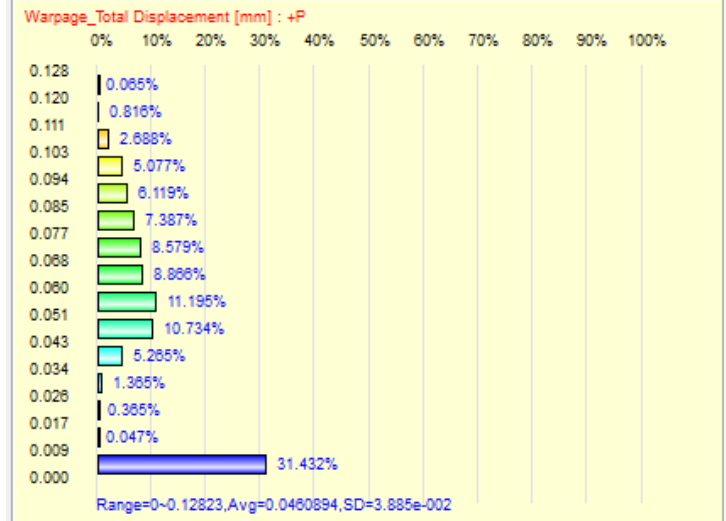
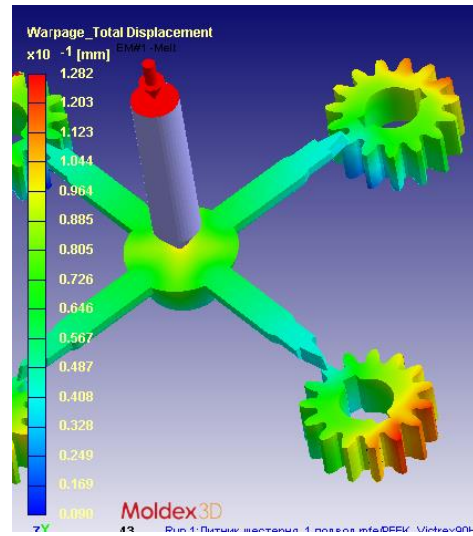
6



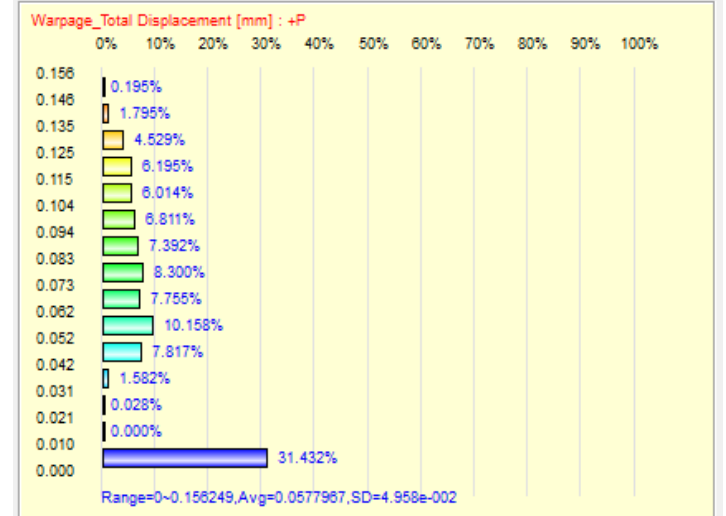
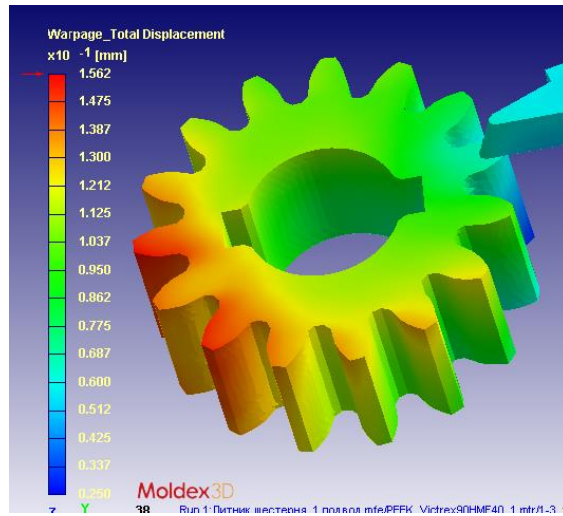
7



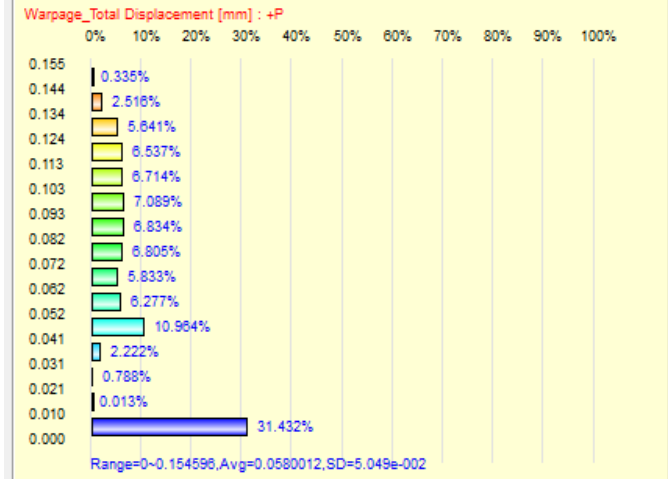
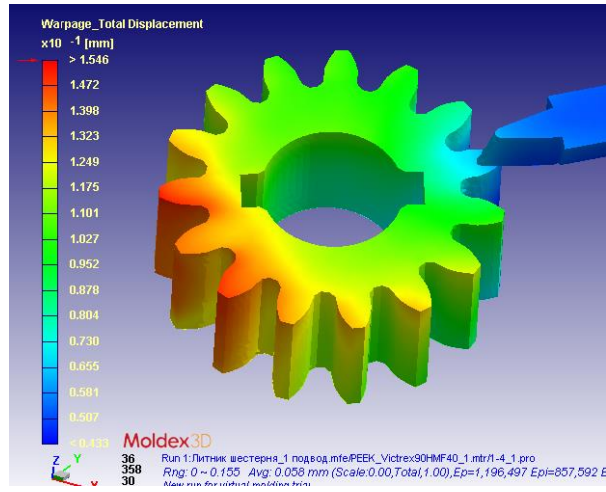
8



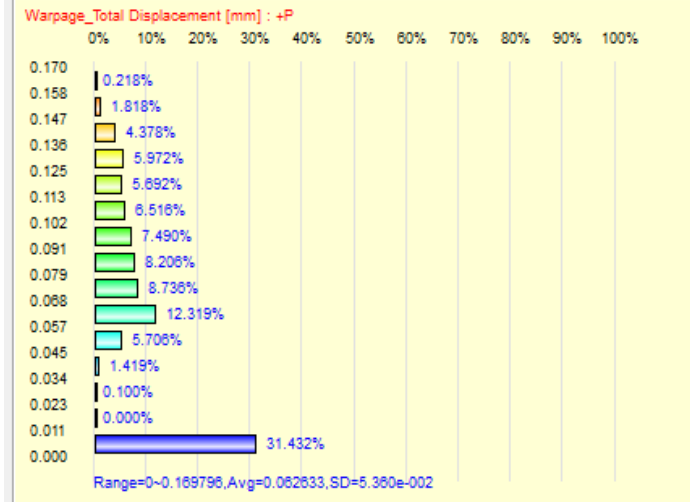
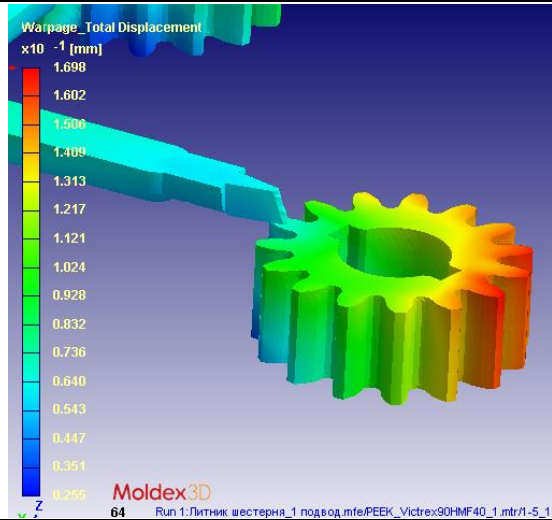
9



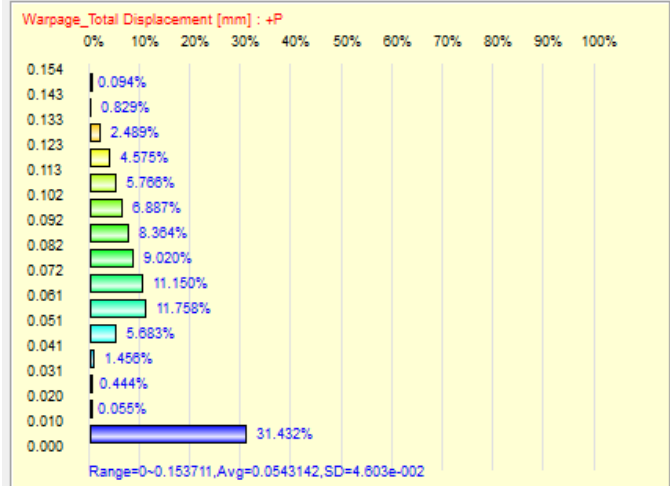
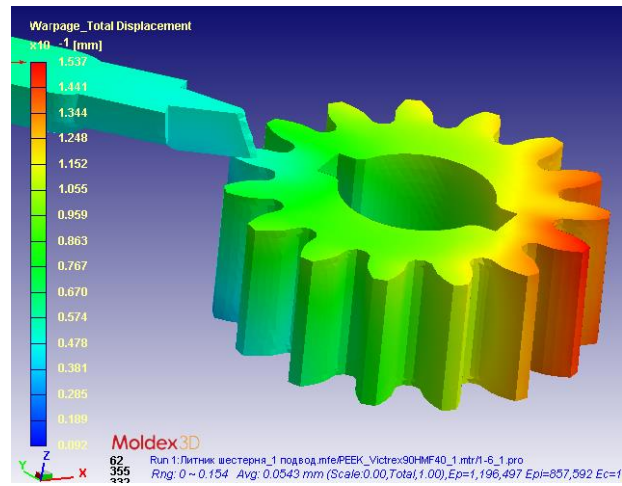
10



11

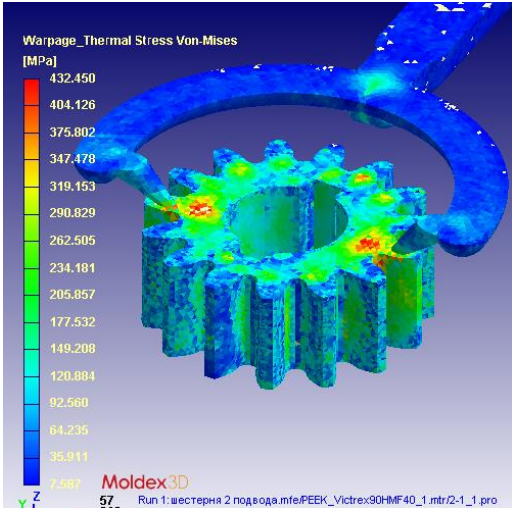
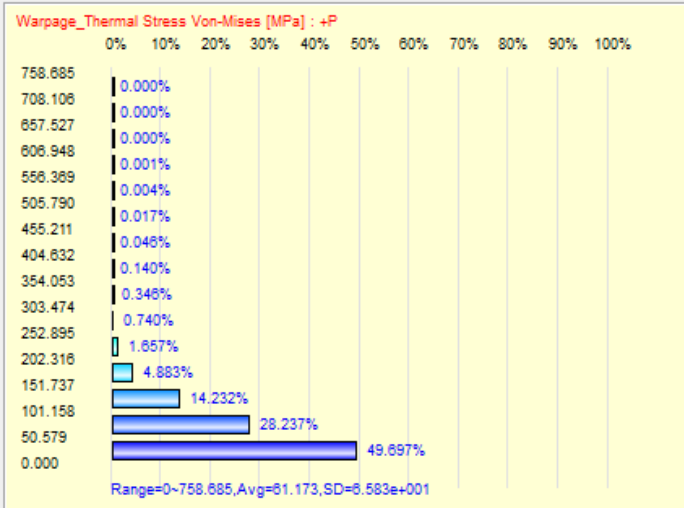


12

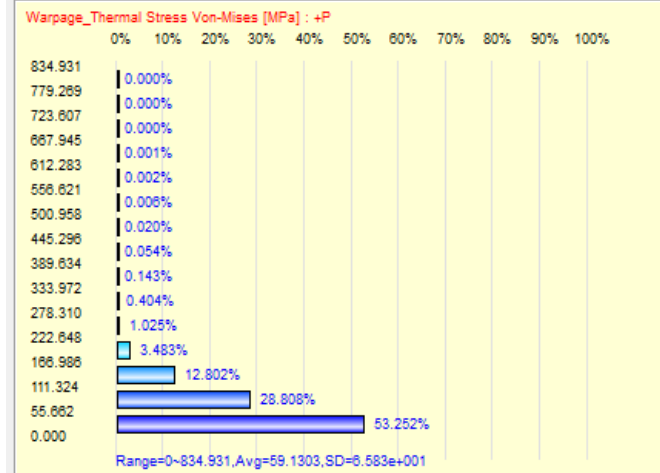
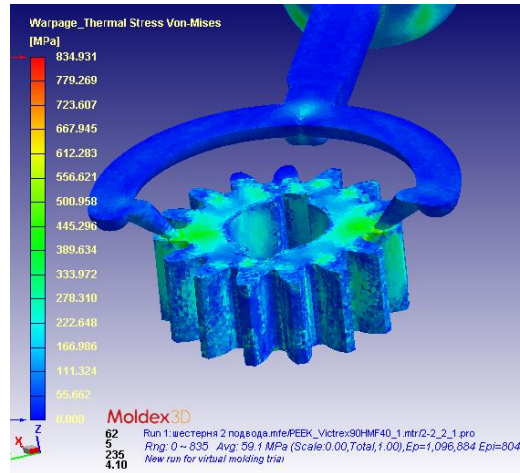


ПРИЛОЖЕНИЕ Б

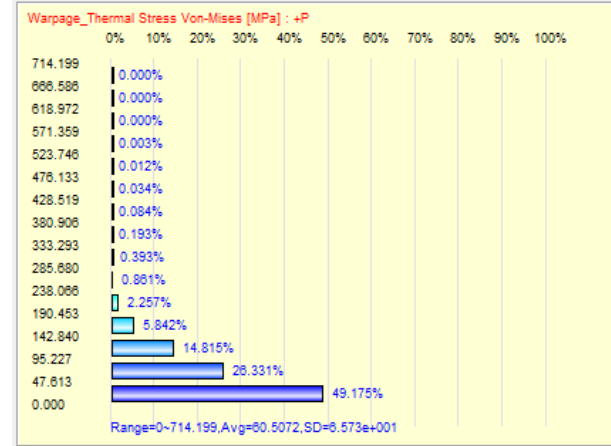
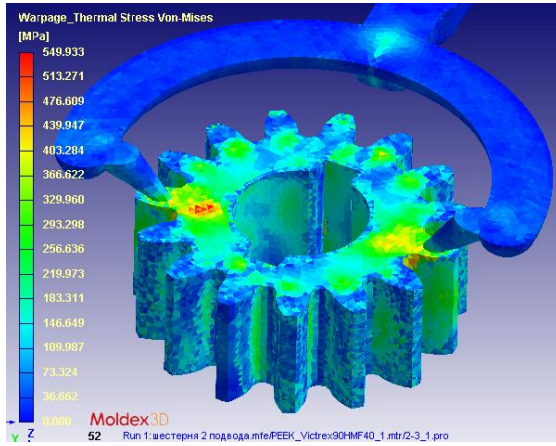
«РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТР «МАКСИМАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО МИЗЕСУ»

| Номер эксперимента | Графическое значение параметра | Гистограмма параметра | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|---|--|--------------------|------------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|-------|--|
| 1 |  <p>Warpage_Thermal Stress Von-Mises [MPa]</p> <p>432.450 404.126 375.802 347.478 319.153 290.829 262.505 234.181 205.857 177.532 149.208 120.884 92.560 64.235 35.911 7.567</p> <p>Moldex3D</p> <p>Run 1: шестерня 2 подвода.mfePEEK_Victrex90HM40_1_mtr(2-1_1).pro</p> |  <p>Warpage_Thermal Stress Von-Mises [MPa] : +P</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Stress Value [MPa]</th> <th>Percentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>758.685</td><td>0.000%</td></tr> <tr><td>708.106</td><td>0.000%</td></tr> <tr><td>657.527</td><td>0.000%</td></tr> <tr><td>606.948</td><td>0.001%</td></tr> <tr><td>556.369</td><td>0.004%</td></tr> <tr><td>505.790</td><td>0.017%</td></tr> <tr><td>455.211</td><td>0.046%</td></tr> <tr><td>404.632</td><td>0.140%</td></tr> <tr><td>354.053</td><td>0.346%</td></tr> <tr><td>303.474</td><td>0.740%</td></tr> <tr><td>252.895</td><td>1.657%</td></tr> <tr><td>202.316</td><td>4.883%</td></tr> <tr><td>151.737</td><td>14.232%</td></tr> <tr><td>101.158</td><td>28.237%</td></tr> <tr><td>50.579</td><td>49.697%</td></tr> <tr><td>0.000</td><td></td></tr> </tbody> </table> <p>Range=0~758.685,Avg=61.173,SD=6.583e+001</p> | Stress Value [MPa] | Percentage | 758.685 | 0.000% | 708.106 | 0.000% | 657.527 | 0.000% | 606.948 | 0.001% | 556.369 | 0.004% | 505.790 | 0.017% | 455.211 | 0.046% | 404.632 | 0.140% | 354.053 | 0.346% | 303.474 | 0.740% | 252.895 | 1.657% | 202.316 | 4.883% | 151.737 | 14.232% | 101.158 | 28.237% | 50.579 | 49.697% | 0.000 | |
| Stress Value [MPa] | Percentage | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 758.685 | 0.000% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 708.106 | 0.000% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 657.527 | 0.000% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 606.948 | 0.001% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 556.369 | 0.004% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 505.790 | 0.017% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 455.211 | 0.046% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 404.632 | 0.140% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 354.053 | 0.346% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 303.474 | 0.740% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 252.895 | 1.657% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 202.316 | 4.883% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 151.737 | 14.232% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 101.158 | 28.237% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 50.579 | 49.697% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

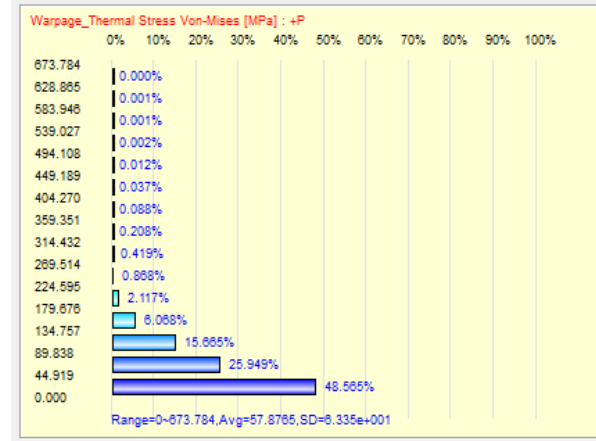
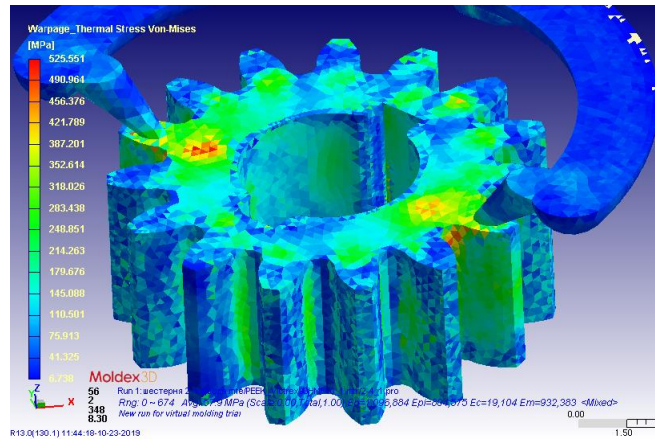
2



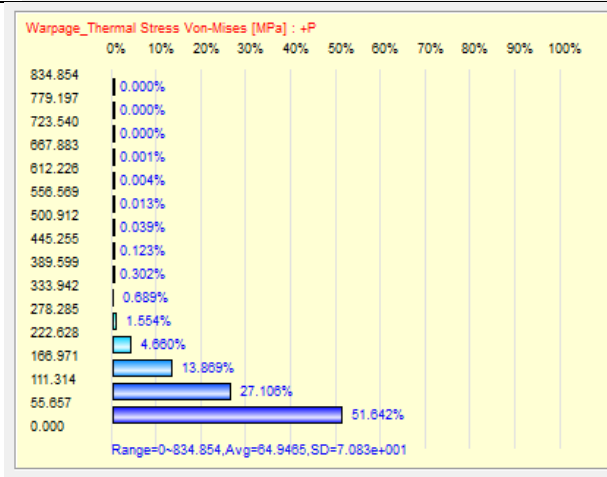
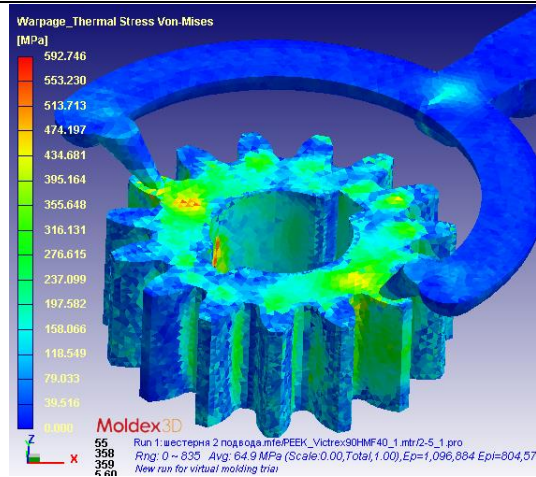
3



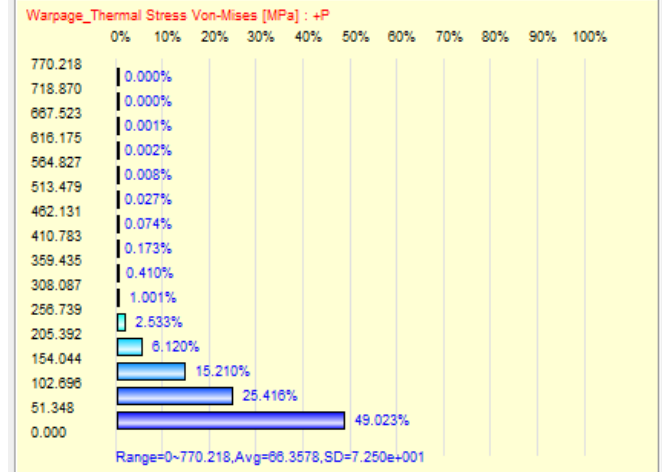
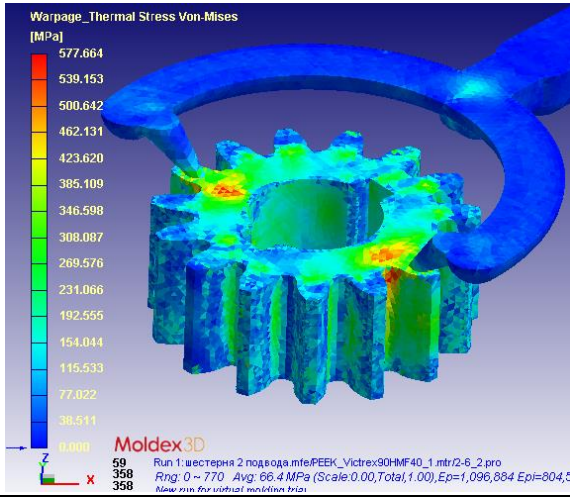
4



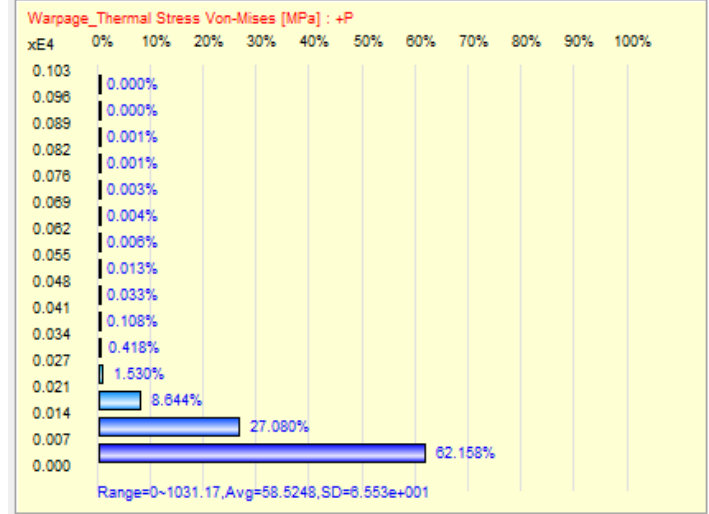
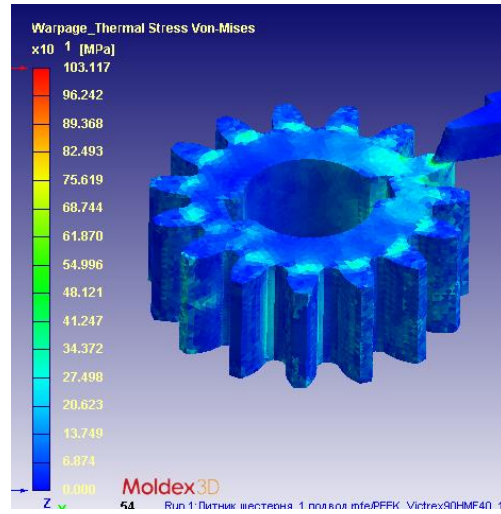
5



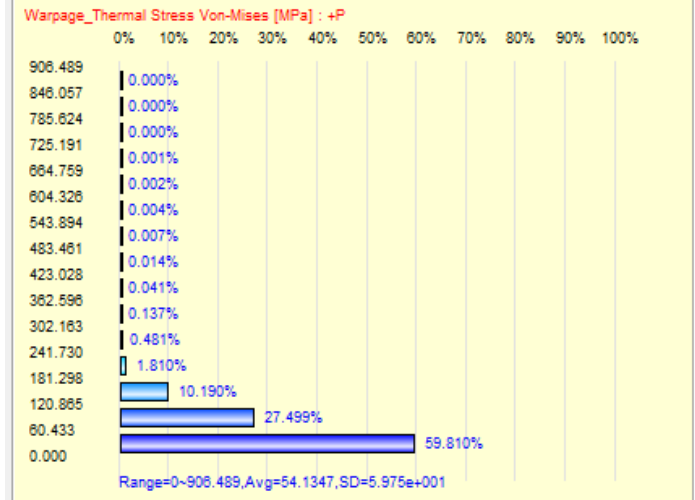
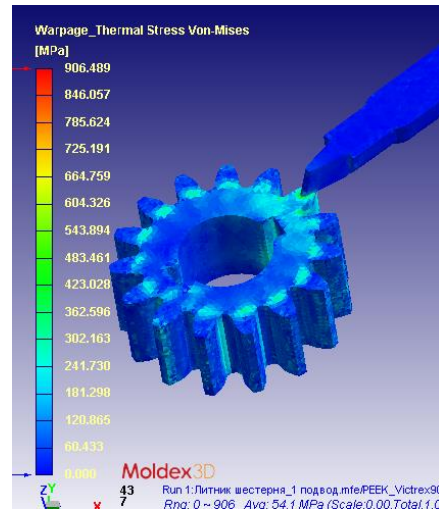
6



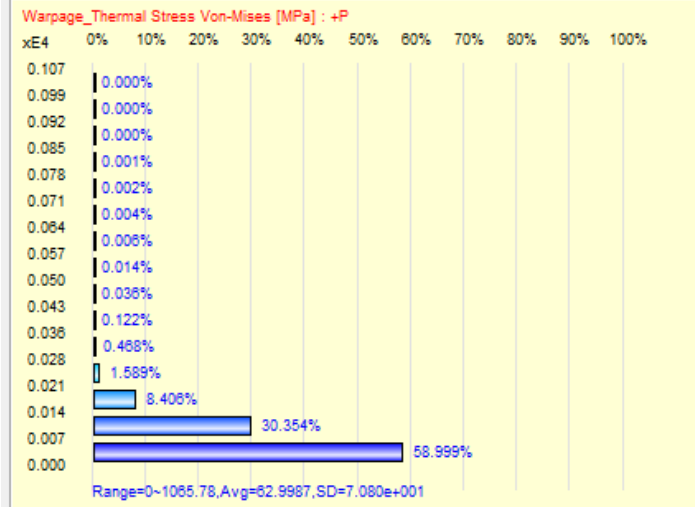
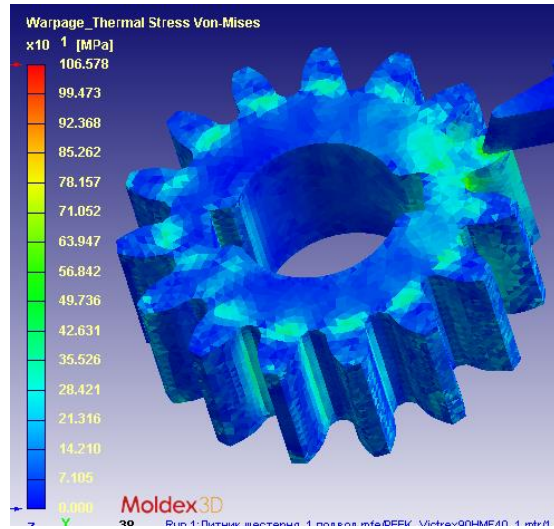
7



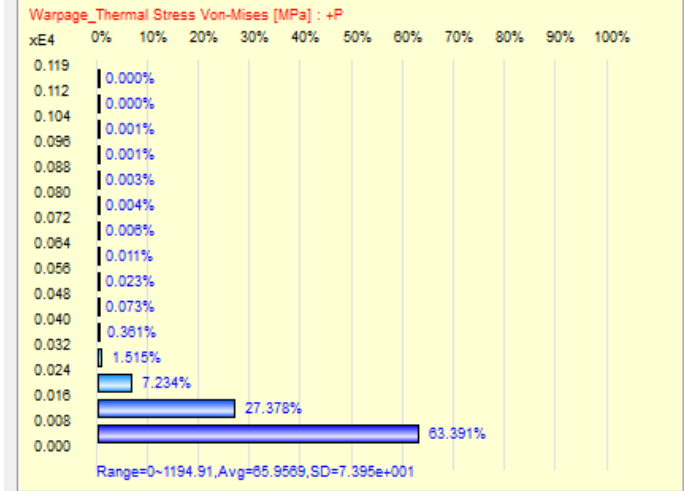
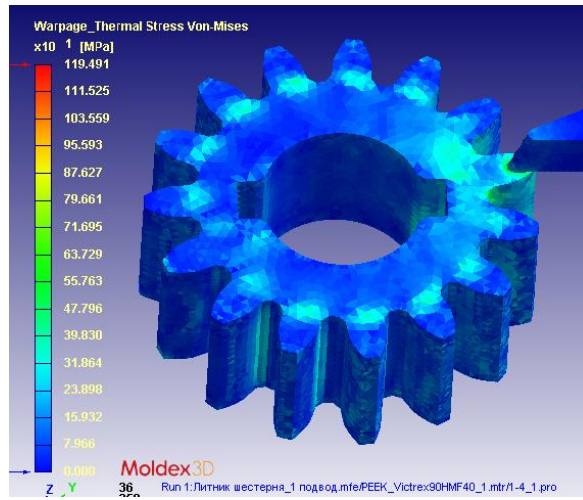
8



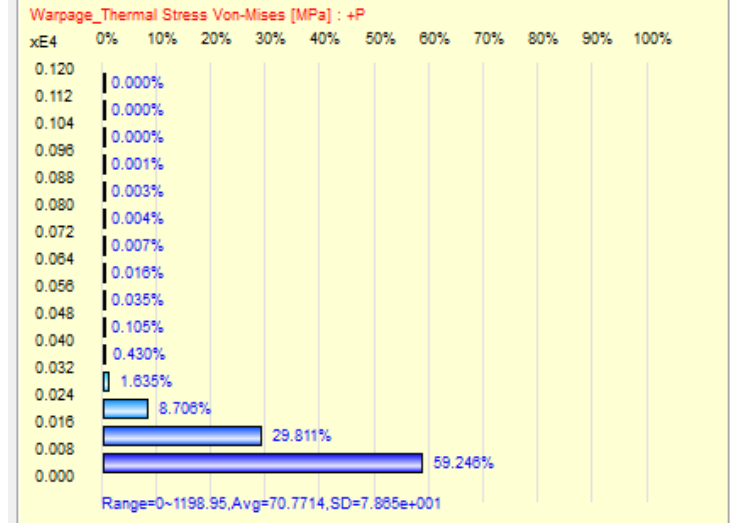
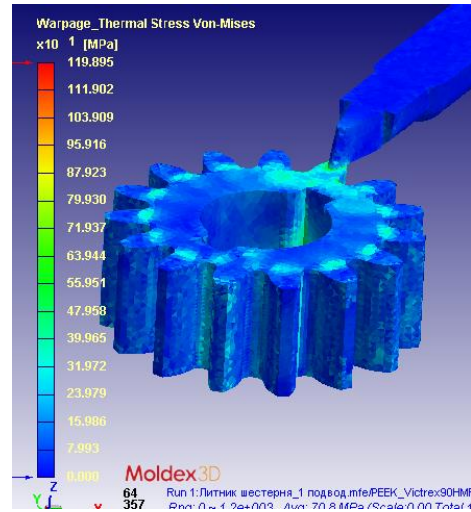
9



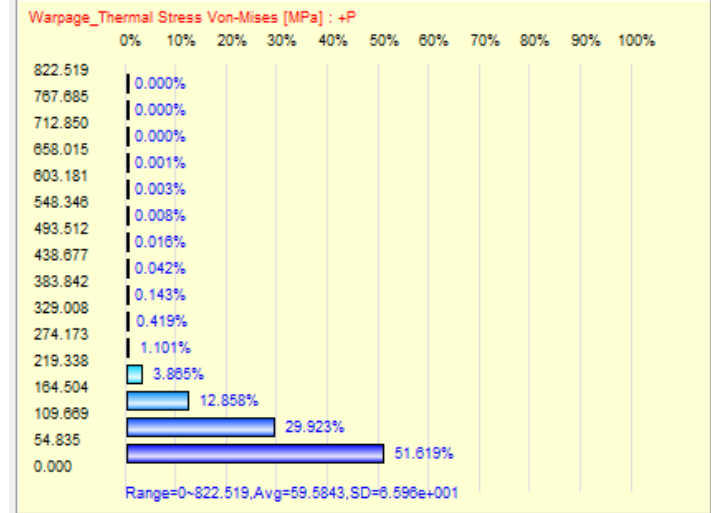
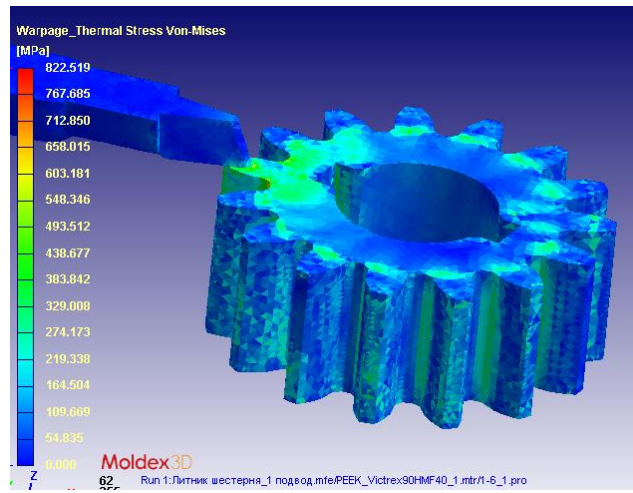
10



11



12

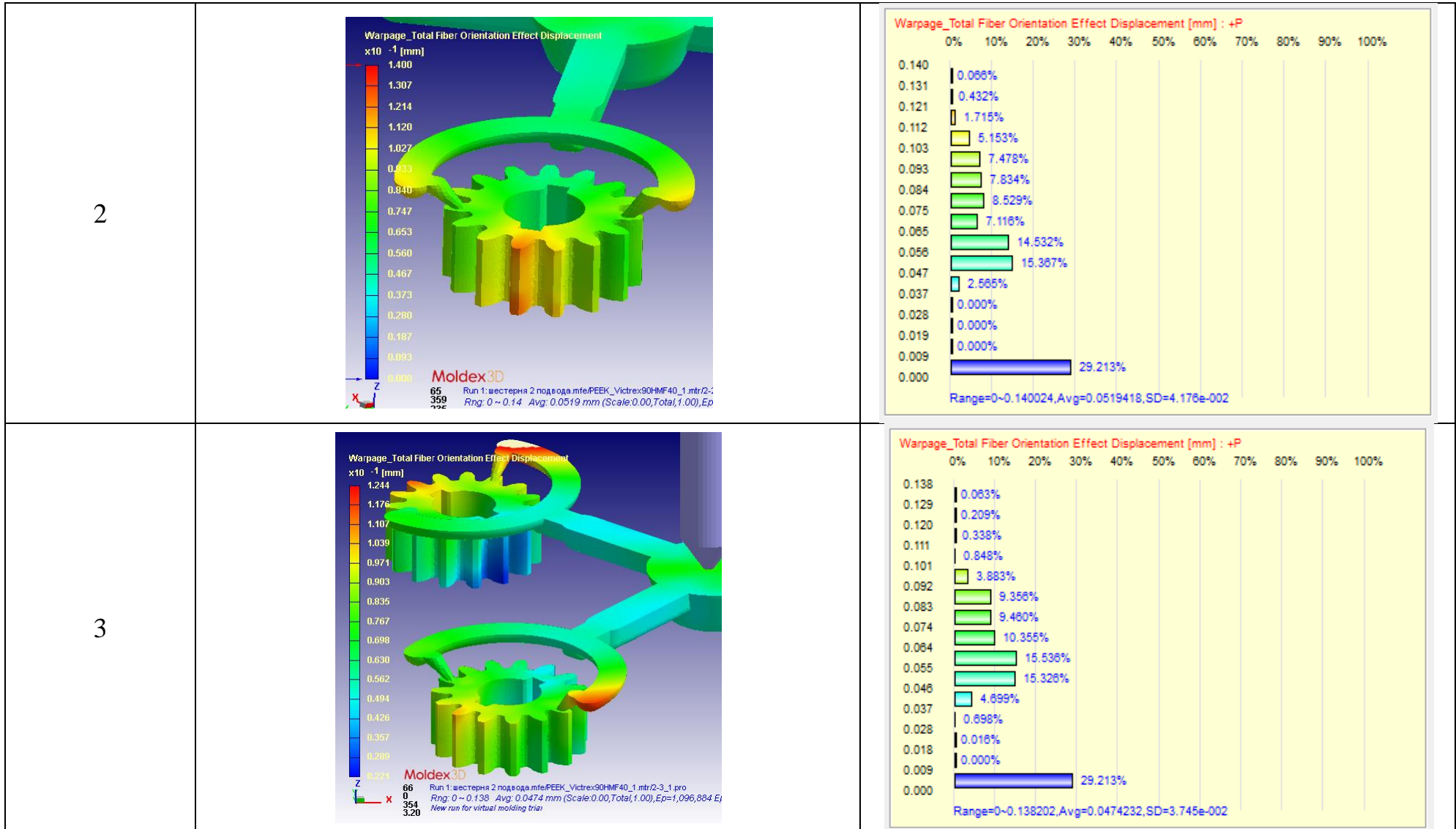


ПРИЛОЖЕНИЕ В

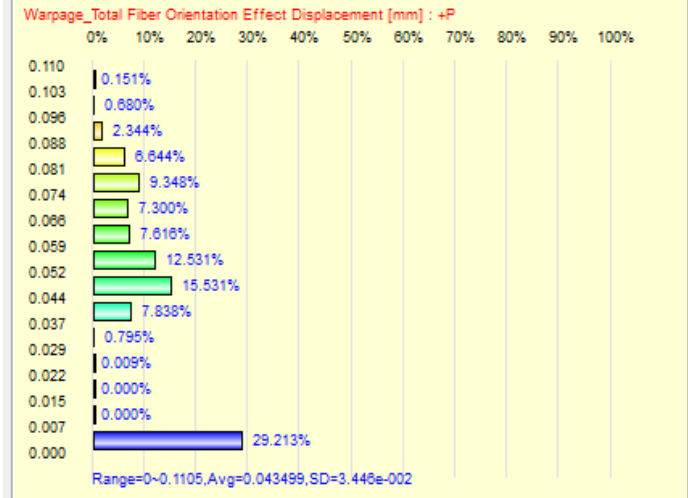
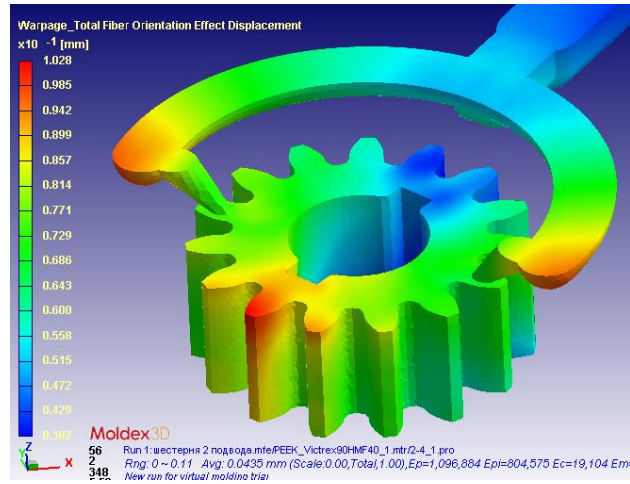
«РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТР

«ОБЩИЙ ЭФФЕКТ ВЛИЯНИЯ ОРИЕНТАЦИИ ВОЛОКОН НА КОРОБЛЕНИЕ»»

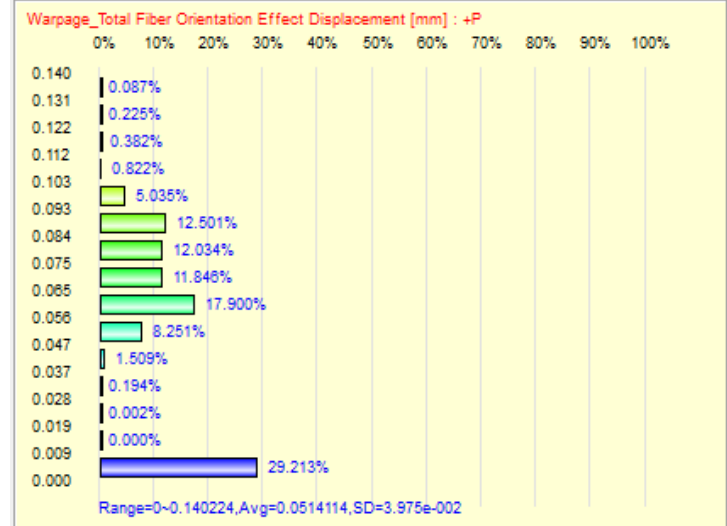
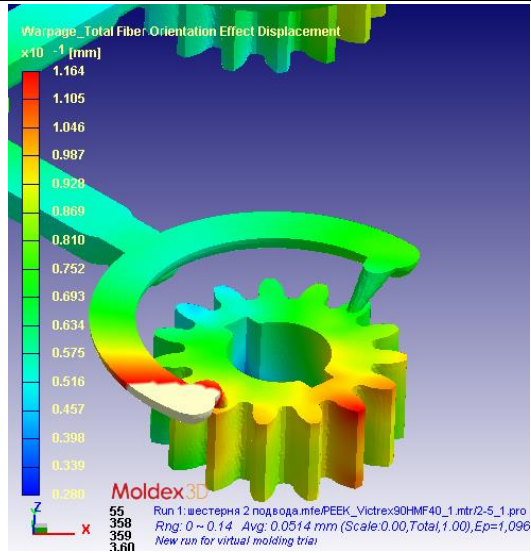
| Номер эксперимента | Графическое значение параметра | Гистограмма параметра | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|--|---|-------------------|------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|---------|-------|---------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|---------|
| 1 | <p>Warpage_Total Fiber Orientation Effect Displacement x10⁻¹ [mm]</p> <p>1.183 1.104 1.026 0.947 0.868 0.789 0.710 0.631 0.552 0.473 0.394 0.316 0.237 0.158 0.079 0.000</p> <p>Moldex3D Run 1: шестерня 2 подвода.mfe/PEEK_Victrex90HMF40_1.mtr/2-1_1.prc Rng: 0 ~ 0.118 Avg: 0.0484 mm (Scale:0.00,Total:1.00,Ep=1,0)</p> | <p>Warpage_Total Fiber Orientation Effect Displacement [mm] : +P</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Displacement [mm]</th> <th>Percentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.118</td><td>0.169%</td></tr> <tr><td>0.110</td><td>0.583%</td></tr> <tr><td>0.103</td><td>2.101%</td></tr> <tr><td>0.095</td><td>9.170%</td></tr> <tr><td>0.087</td><td>9.637%</td></tr> <tr><td>0.079</td><td>8.199%</td></tr> <tr><td>0.071</td><td>7.884%</td></tr> <tr><td>0.063</td><td>14.179%</td></tr> <tr><td>0.055</td><td>15.705%</td></tr> <tr><td>0.047</td><td>2.966%</td></tr> <tr><td>0.039</td><td>0.195%</td></tr> <tr><td>0.032</td><td>0.000%</td></tr> <tr><td>0.024</td><td>0.000%</td></tr> <tr><td>0.016</td><td>0.000%</td></tr> <tr><td>0.008</td><td>0.000%</td></tr> <tr><td>0.000</td><td>29.213%</td></tr> </tbody> </table> <p>Range=0~0.118333,Avg=0.0483506,SD=3.788e-002</p> | Displacement [mm] | Percentage | 0.118 | 0.169% | 0.110 | 0.583% | 0.103 | 2.101% | 0.095 | 9.170% | 0.087 | 9.637% | 0.079 | 8.199% | 0.071 | 7.884% | 0.063 | 14.179% | 0.055 | 15.705% | 0.047 | 2.966% | 0.039 | 0.195% | 0.032 | 0.000% | 0.024 | 0.000% | 0.016 | 0.000% | 0.008 | 0.000% | 0.000 | 29.213% |
| Displacement [mm] | Percentage | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.118 | 0.169% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.110 | 0.583% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.103 | 2.101% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.095 | 9.170% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.087 | 9.637% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.079 | 8.199% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.071 | 7.884% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.063 | 14.179% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.055 | 15.705% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.047 | 2.966% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.039 | 0.195% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.032 | 0.000% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.024 | 0.000% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.016 | 0.000% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.008 | 0.000% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.000 | 29.213% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |



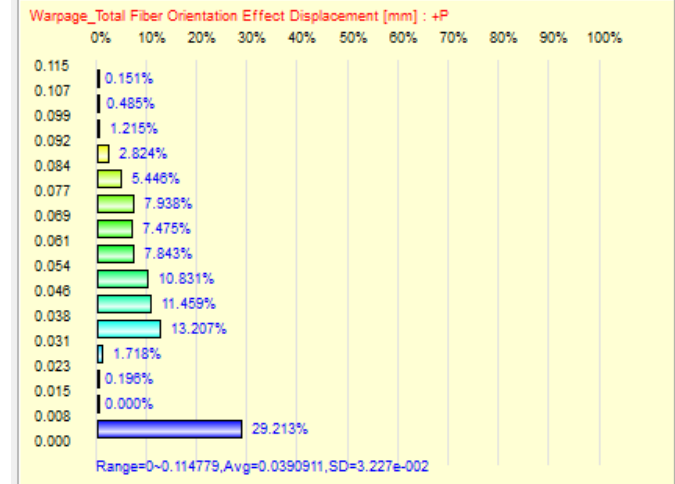
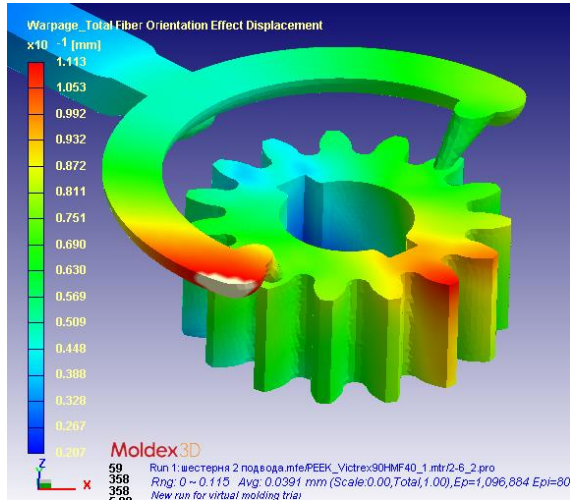
4



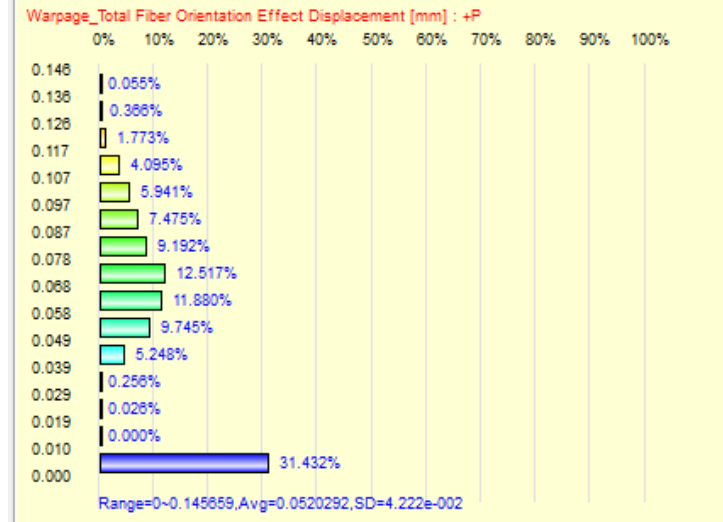
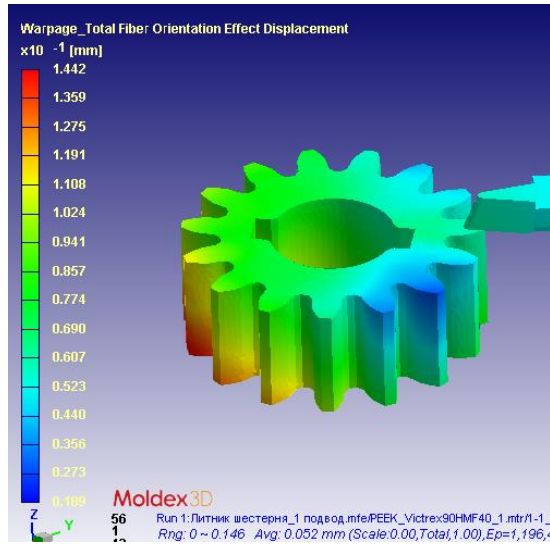
5

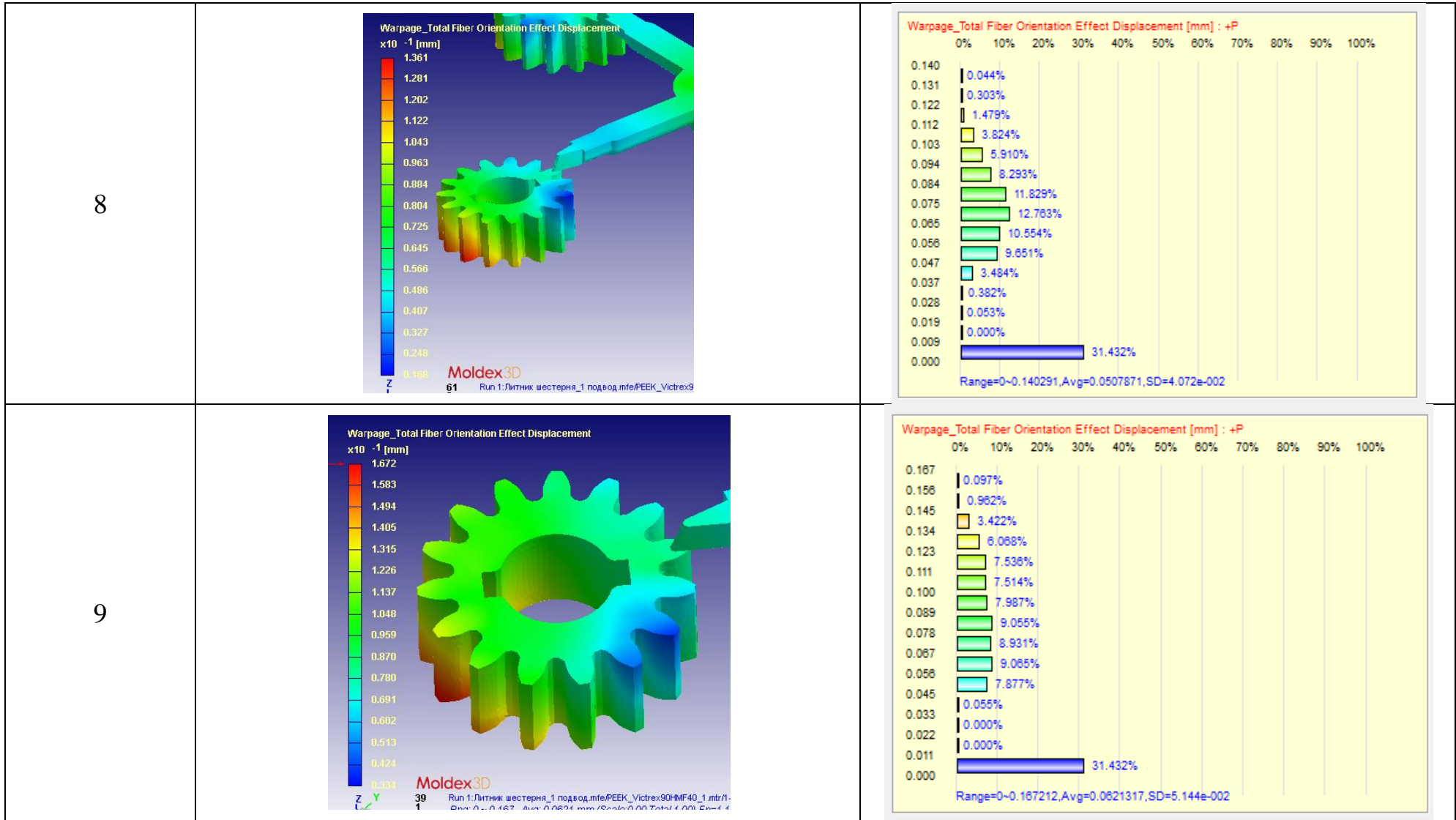


6

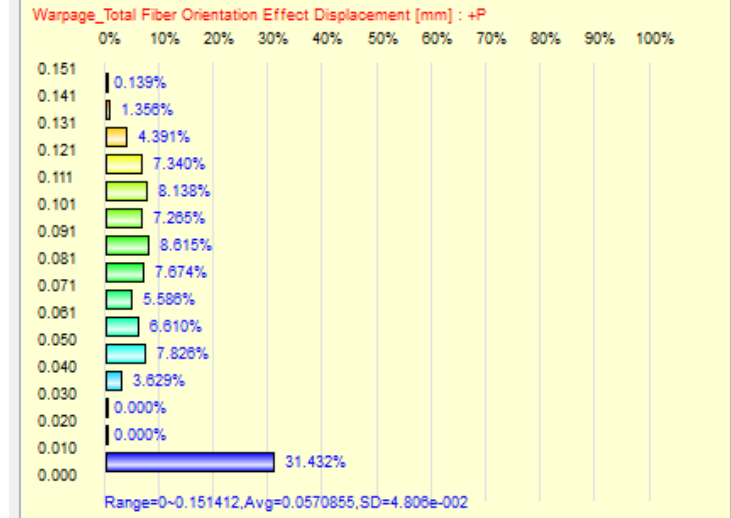
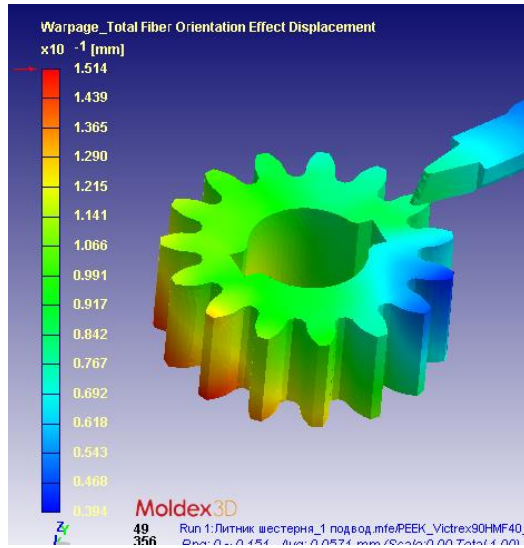


7

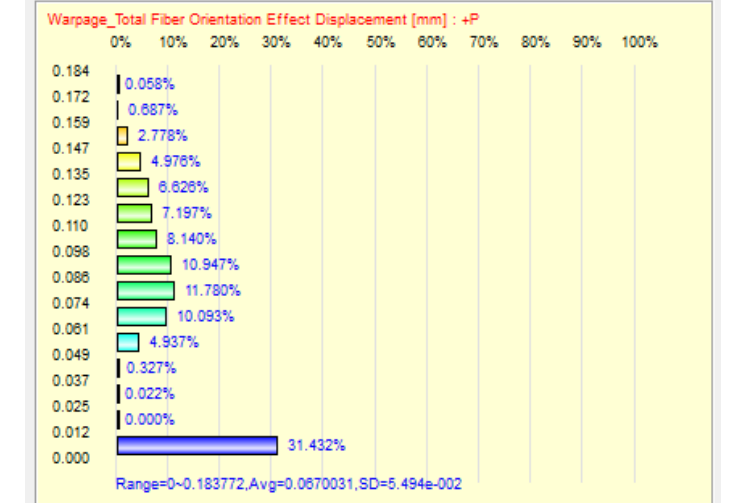
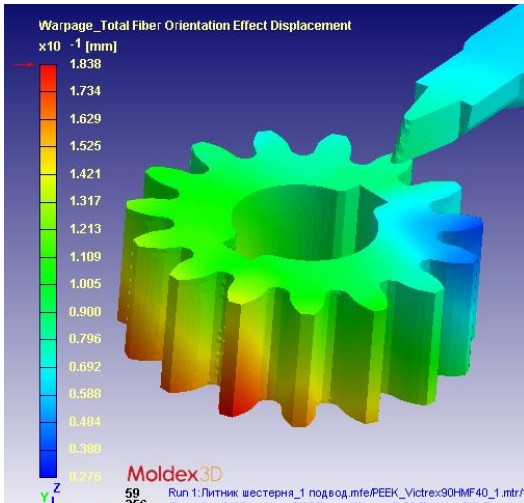




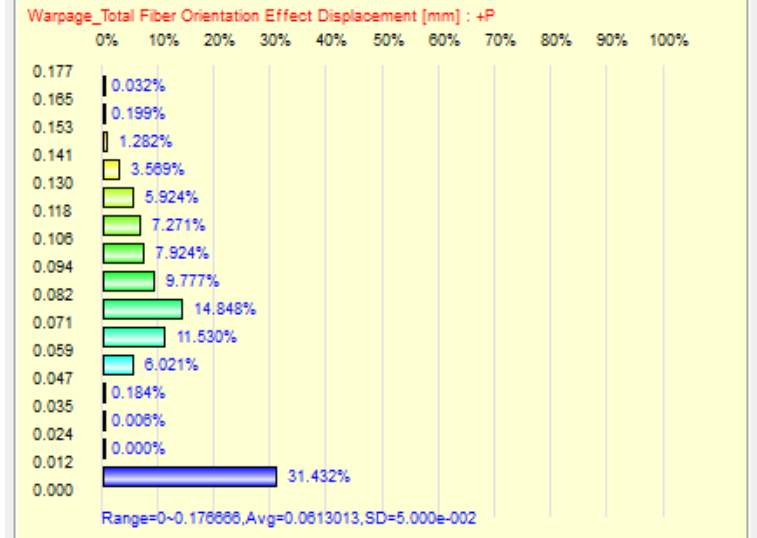
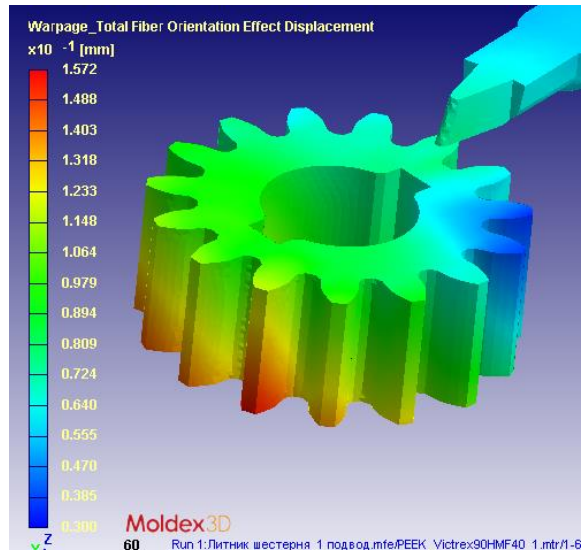
10



11

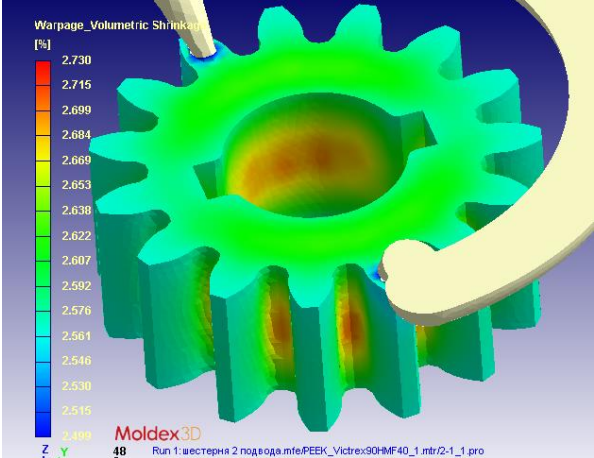
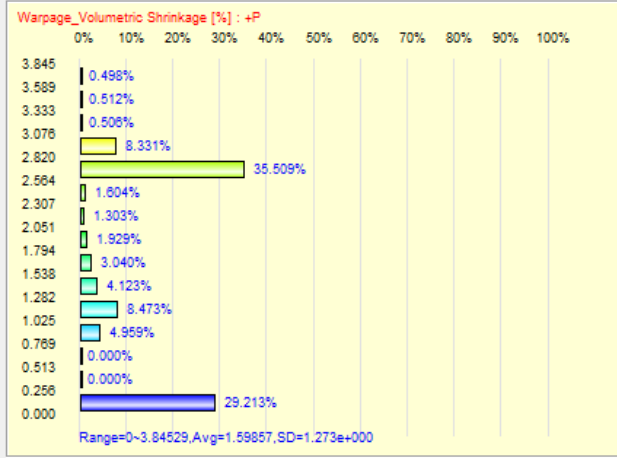


12

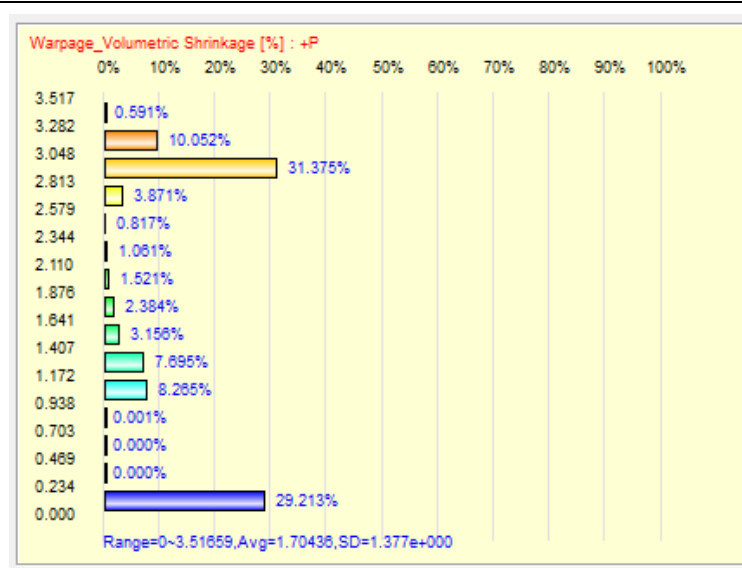
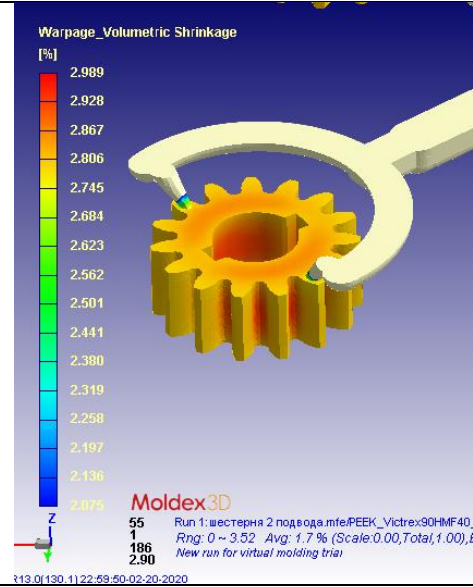


ПРИЛОЖЕНИЕ Г

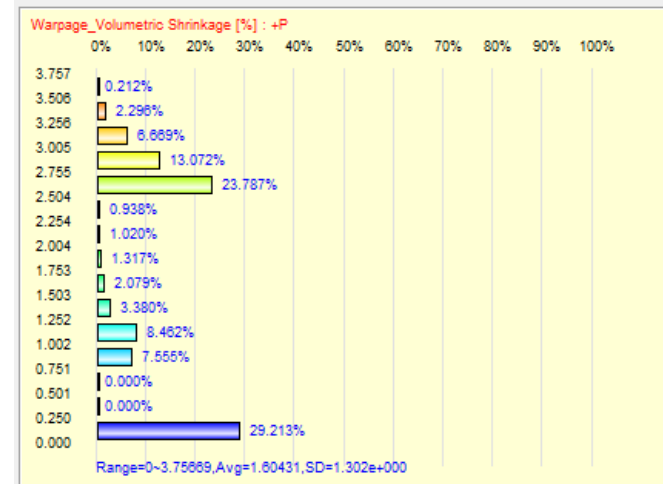
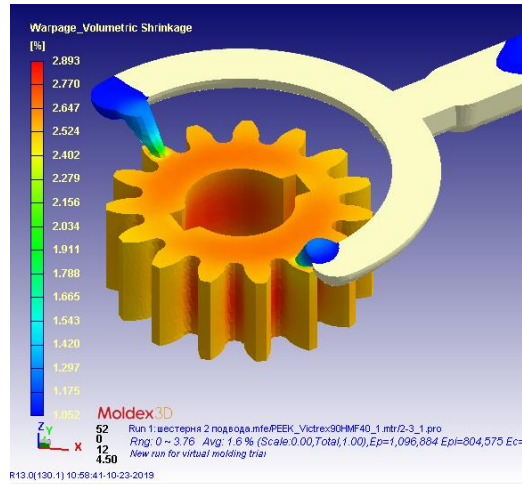
«РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТР «ОБЪЕМНАЯ УСАДКА»»

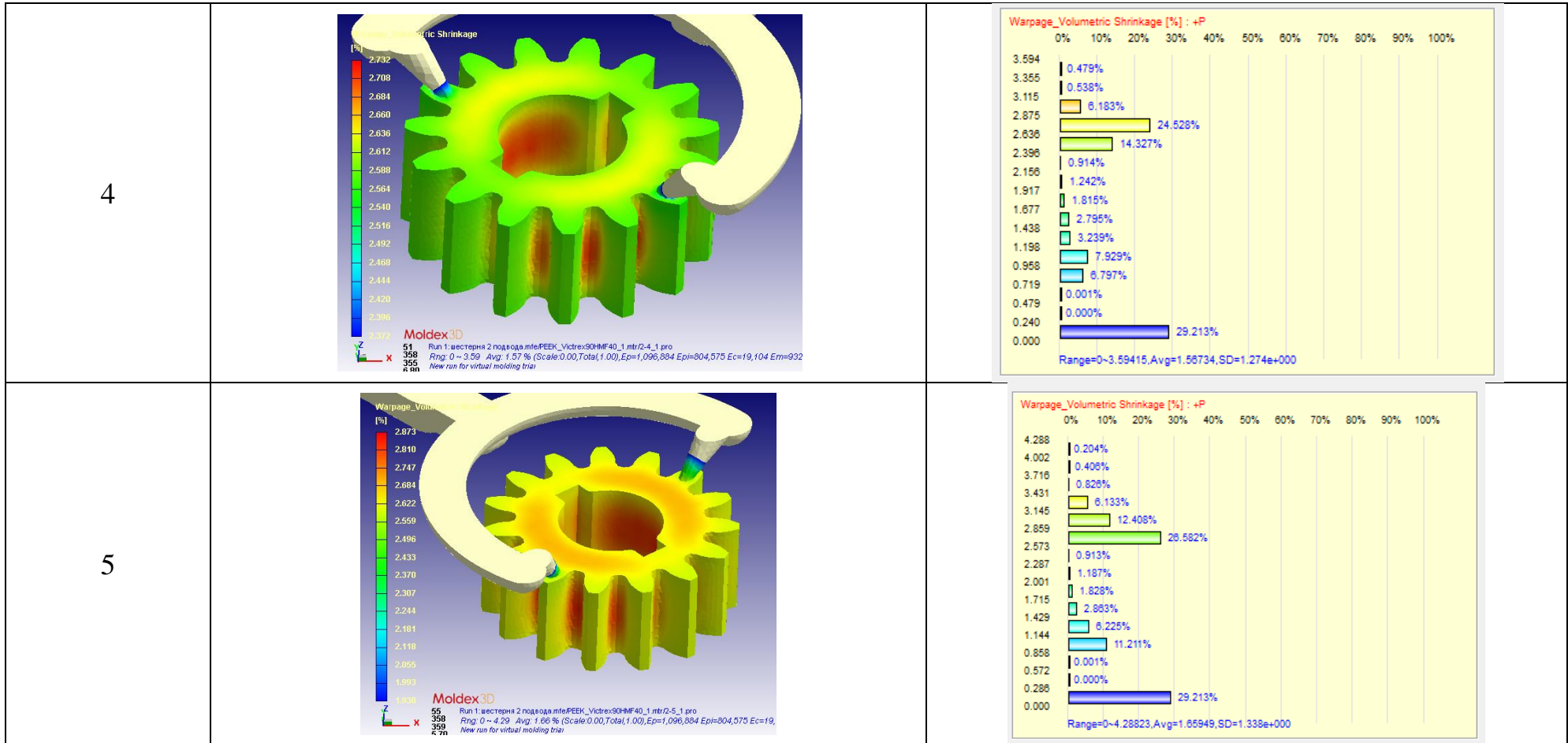
| Номер эксперимента | Графическое значение параметра | Гистограмма параметра |
|--------------------|--|--|
| 1 |  <p>Warpage_Volumetric Shrinkage [%]</p> <p>2.730 2.715 2.699 2.684 2.669 2.653 2.638 2.622 2.607 2.592 2.576 2.561 2.546 2.530 2.515 2.499</p> <p>Moldex3D 48 Run 1: шестерня 2 подвода.mfe/PEEK_Victrex90HMF40_1.mtr/2-1_1.pro</p> |  <p>Warpage_Volumetric Shrinkage [%] : +P</p> <p>0% 10% 20% 30% 40% 50% 60% 70% 80% 90% 100%</p> <p>3.845 0.498% 3.589 0.512% 3.333 0.508% 3.076 8.331% 2.820 35.509% 2.564 1.804% 2.307 1.303% 2.051 1.929% 1.794 3.040% 1.538 4.123% 1.282 8.473% 1.025 4.959% 0.769 0.000% 0.513 0.000% 0.256 29.213% 0.000</p> <p>Range=0-3.84529,Avg=1.59857,SD=1.273e+000</p> |

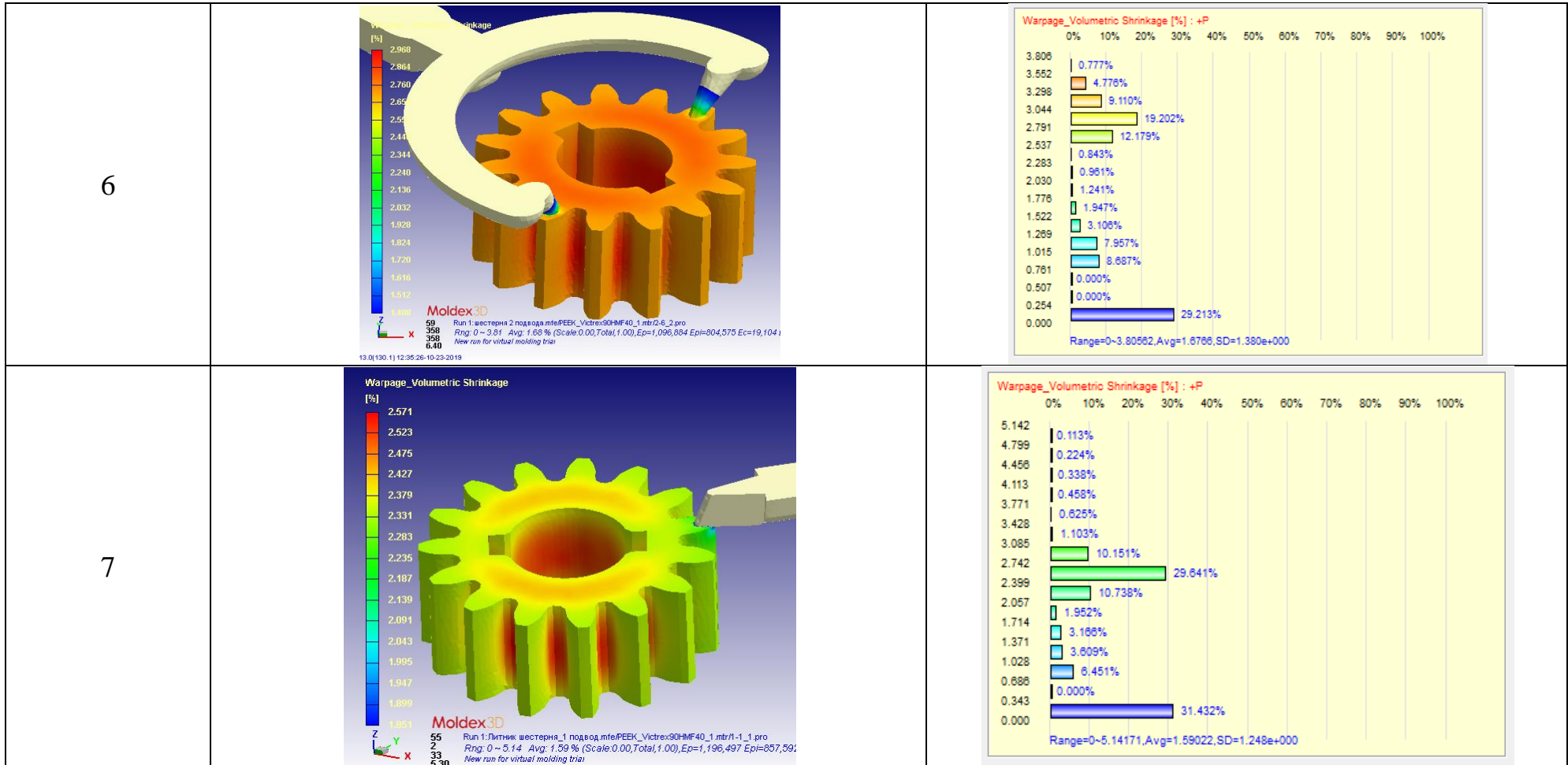
2

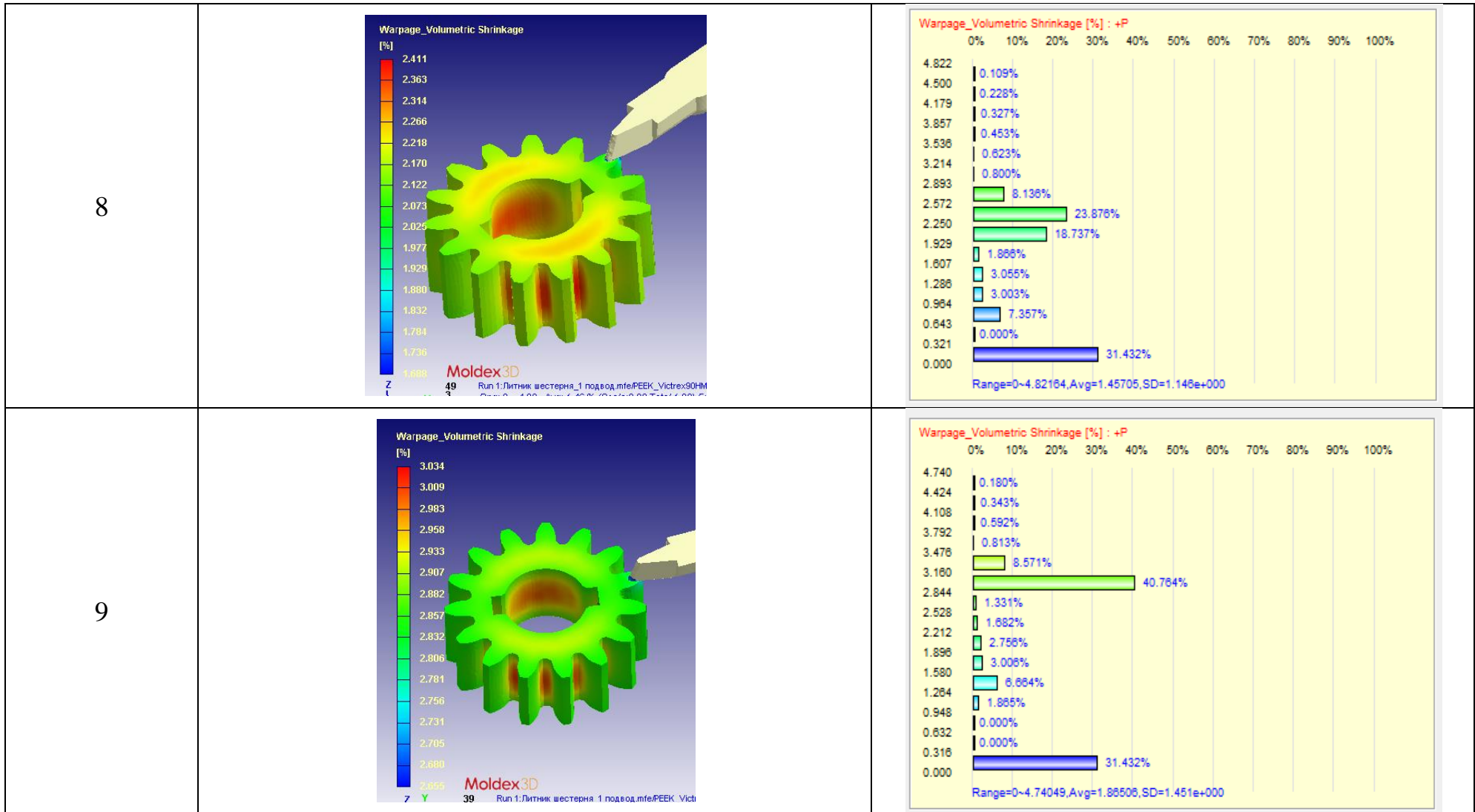


3

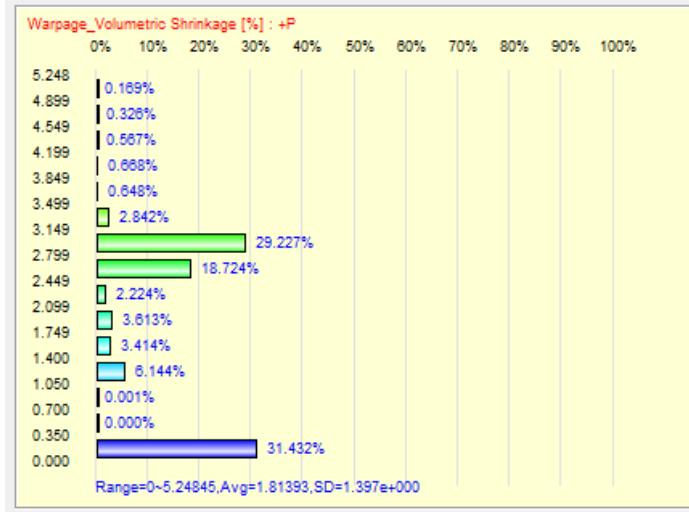
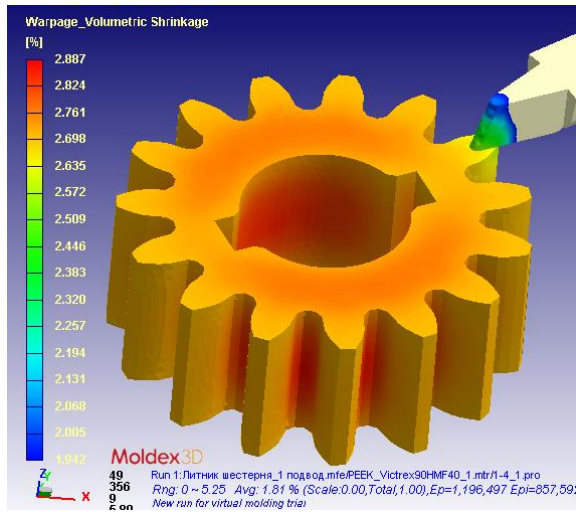




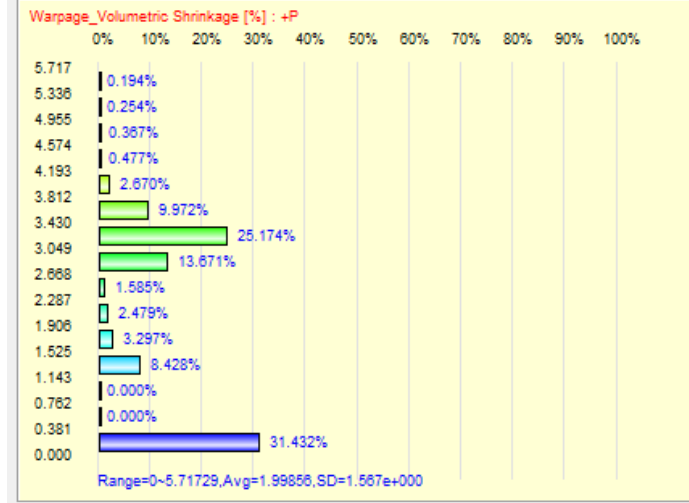
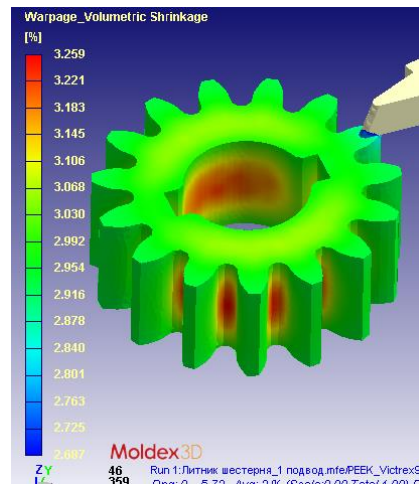




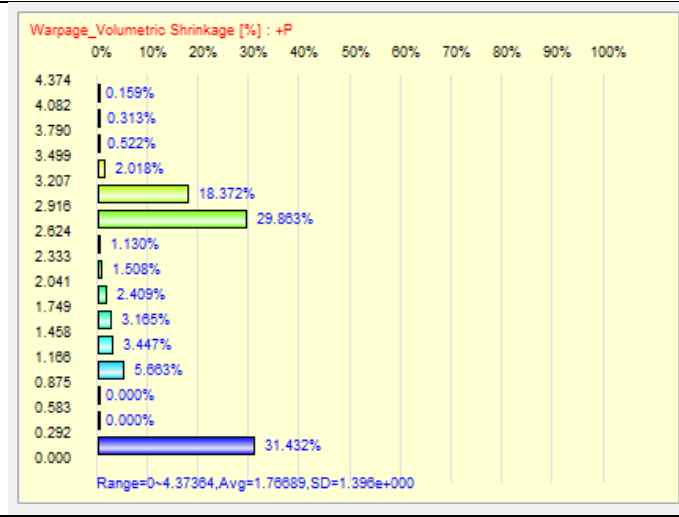
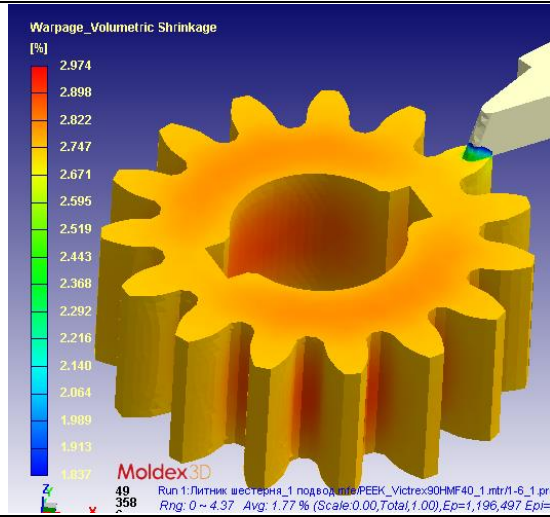
10



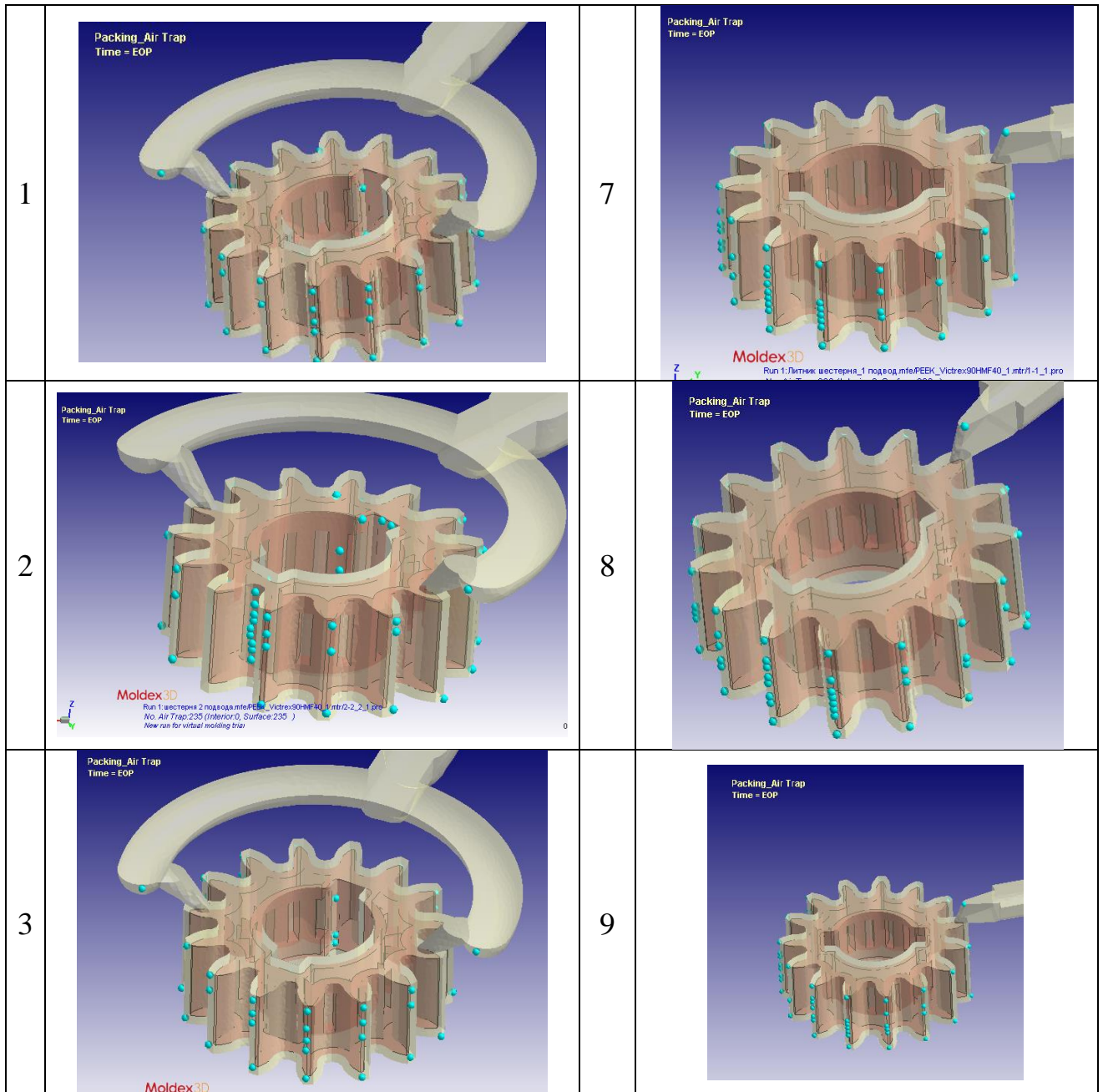
11

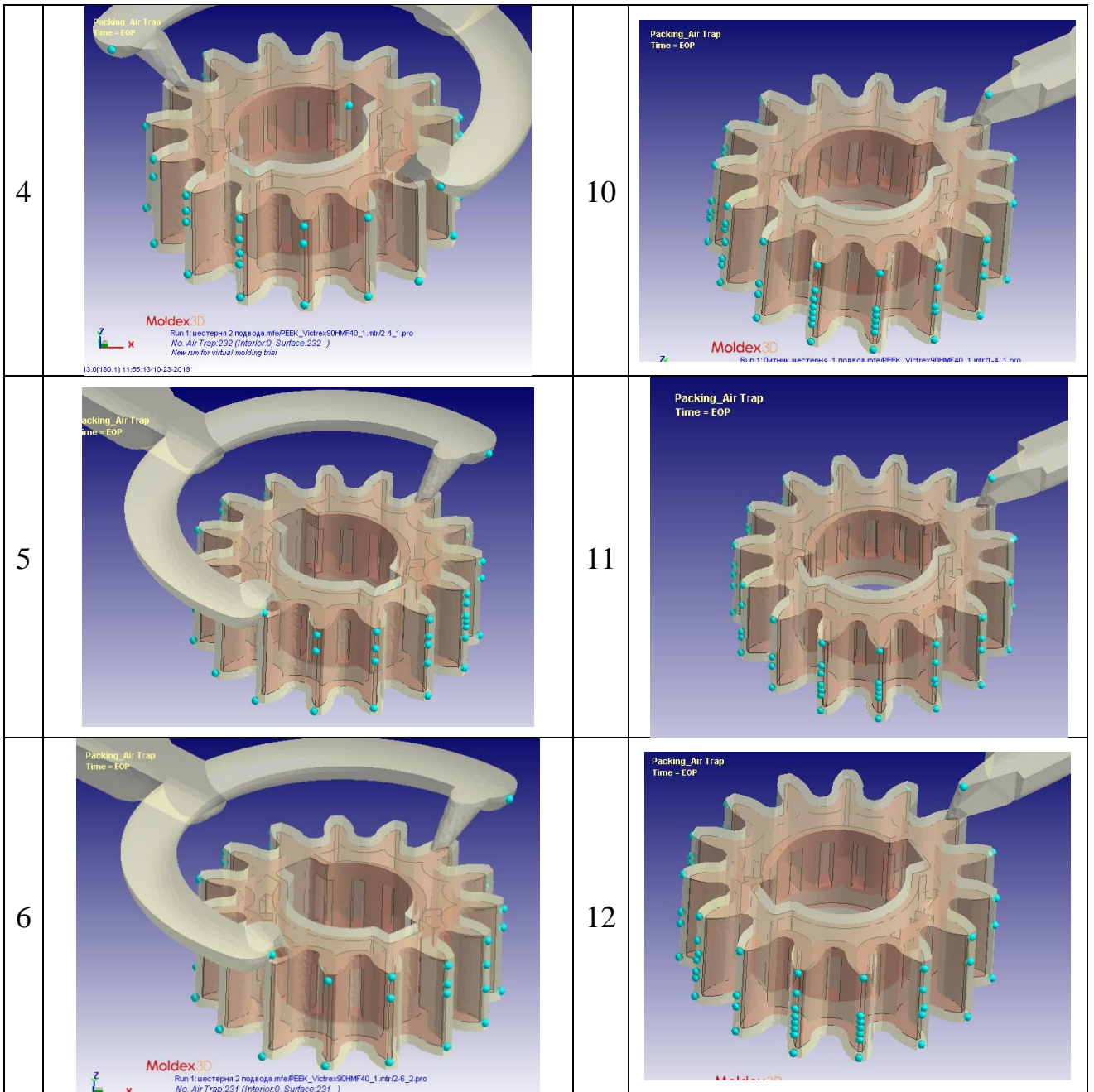


12



ПРИЛОЖЕНИЕ Д
«РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПАРАМЕТР «AIR TRAP»»



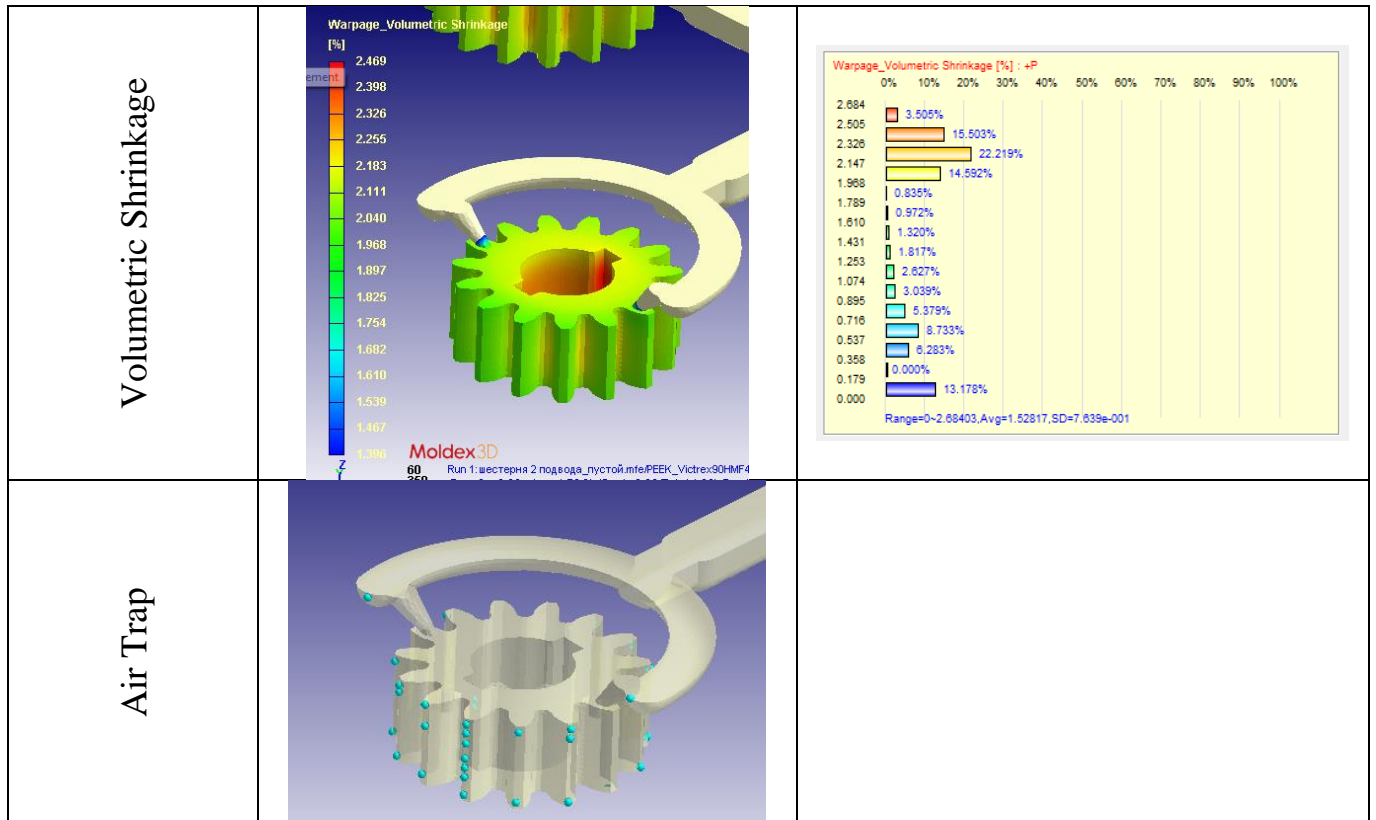


ПРИЛОЖЕНИЕ Е
«РЕЗУЛЬТАТЫ GREY RELATIONAL АНАЛИЗА»

| | y_1 | y_2 | y_3 | y_4 | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | ξ_1 | ξ_2 | ξ_3 | ξ_4 | γ |
|----|--------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|----------|
| 1 | 1,7272 | 432,4500 | 0,1874 | 0,1066 | 0,4382 | 0,5431 | 0,6131 | 0,0661 | 0,5329 | 0,4794 | 0,4492 | 0,8833 | 0,6144 |
| 2 | 1,6533 | 534,3560 | 0,0516 | 0,1267 | 0,3566 | 0,8335 | 0,0000 | 0,3167 | 0,5837 | 0,3749 | 1,0000 | 0,6122 | 0,6859 |
| 3 | 2,2362 | 549,9300 | 0,1807 | 0,1055 | 1,0000 | 0,8779 | 0,5828 | 0,0524 | 0,3333 | 0,3629 | 0,4618 | 0,9052 | 0,5385 |
| 4 | 1,5742 | 525,5500 | 0,0883 | 0,1013 | 0,2694 | 0,8084 | 0,1657 | 0,0000 | 0,6499 | 0,3821 | 0,7511 | 1,0000 | 0,7668 |
| 5 | 1,5048 | 592,7500 | 0,1997 | 0,1038 | 0,1927 | 1,0000 | 0,6690 | 0,0312 | 0,7218 | 0,3333 | 0,4277 | 0,9413 | 0,6947 |
| 6 | 1,6356 | 577,6600 | 0,1555 | 0,1025 | 0,3370 | 0,9570 | 0,4689 | 0,0150 | 0,5973 | 0,3432 | 0,5160 | 0,9709 | 0,6764 |
| 7 | 1,6793 | 274,9800 | 0,2695 | 0,1439 | 0,3854 | 0,0942 | 0,9842 | 0,5312 | 0,5647 | 0,8415 | 0,3369 | 0,4849 | 0,4977 |
| 8 | 1,5259 | 241,9300 | 0,2731 | 0,1351 | 0,2160 | 0,0000 | 1,0000 | 0,4214 | 0,6983 | 1,0000 | 0,3333 | 0,5426 | 0,5754 |
| 9 | 1,3596 | 284,2100 | 0,2068 | 0,1650 | 0,0324 | 0,1205 | 0,7007 | 0,7943 | 0,9391 | 0,8058 | 0,4164 | 0,3863 | 0,6359 |
| 10 | 1,3302 | 318,6400 | 0,1222 | 0,1480 | 0,0000 | 0,2187 | 0,3187 | 0,5823 | 1,0000 | 0,6957 | 0,6107 | 0,4620 | 0,7261 |
| 11 | 1,4814 | 319,7200 | 0,2345 | 0,1815 | 0,1669 | 0,2217 | 0,8258 | 1,0000 | 0,7497 | 0,6928 | 0,3771 | 0,3333 | 0,5288 |
| 12 | 1,4216 | 383,8400 | 0,1005 | 0,1538 | 0,1009 | 0,4045 | 0,2209 | 0,6546 | 0,8321 | 0,5528 | 0,6936 | 0,4330 | 0,6638 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж
«РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА
ЗАЛИВКИ ШЕСТЕРНИ
БЕЗ ЗАКЛАДНОГО АРМИРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА»

| Параметр инжекционно ГО ЛИТЯ | Графическое значение параметра | Гистограмма параметра |
|--|---|---|
| Total Displacement | <p>Warpage_Total Displacement x10⁻² [mm] 8.567 7.996 7.424 6.853 6.282 5.711 5.140 4.569 3.998 3.427 2.856 2.284 1.713 1.142 0.571 0.000 Moldex3D</p> | <p>Warpage_Total Displacement [mm] : +P x10⁻² 0% 10% 20% 30% 40% 50% 60% 70% 80% 90% 100% 8.567 0.031% 7.996 0.098% 7.424 0.393% 6.853 1.010% 6.282 2.681% 5.711 6.314% 5.140 9.978% 4.569 11.982% 3.998 11.597% 3.427 15.058% 2.856 17.294% 2.284 7.032% 1.713 2.485% 1.142 0.733% 0.571 13.315% 0.000 Range=0~0.0858683,Avg=0.0313533,SD=1.437e-002</p> |
| Thermal Stress Von-Mises | <p>Warpage_Thermal Stress Von-Mises [MPa] 802.164 748.687 695.209 641.731 588.254 534.776 481.299 427.821 374.343 320.866 267.388 213.910 160.433 106.955 53.478 0.000 Moldex3D</p> | <p>Warpage_Thermal Stress Von-Mises [MPa] : +P 0% 10% 20% 30% 40% 50% 60% 70% 80% 90% 100% 802.164 0.000% 748.687 0.000% 695.209 0.000% 641.732 0.000% 588.254 0.000% 534.778 0.002% 481.299 0.008% 427.821 0.017% 374.343 0.055% 320.868 0.188% 267.388 0.648% 213.910 2.345% 160.433 9.051% 106.955 34.885% 53.478 52.205% 0.000 Range=0~802.164,Avg=56.1839,SD=5.520e+001</p> |
| Total Fiber Orientation Effect Displacement | <p>Warpage_Total Fiber Orientation Effect Displacement x10⁻² [mm] 8.498 7.932 7.365 6.799 6.232 5.665 5.099 4.532 3.966 3.399 2.833 2.266 1.700 1.133 0.567 0.000 Moldex3D</p> | <p>Warpage_Total Fiber Orientation Effect Displacement [mm] : +P x10⁻² 0% 10% 20% 30% 40% 50% 60% 70% 80% 90% 100% 8.498 0.079% 7.932 0.330% 7.365 1.105% 6.799 3.035% 6.232 6.329% 5.665 10.250% 5.099 11.176% 4.532 9.858% 3.966 14.078% 3.399 19.152% 2.833 9.093% 2.266 1.859% 1.700 0.478% 1.133 0.000% 0.567 13.178% 0.000 Range=0~0.0849817,Avg=0.0358089,SD=1.445e-002</p> |



ПРИЛОЖЕНИЕ 3
АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ ООО "ВНЕДРЕНЧЕСКАЯ ФИРМА "ПЛАДЕП"



АКТ

внедрения результатов диссертационного исследования

г. Самара «16» марта 2026 г.

Мы, нижеподписавшиеся, составили настоящий акт о том, что в ООО «Внедренческая фирма «Пладеп» (пластиковые детали подшипников) внедрены результаты диссертационного исследования Галкиной Натальи Викторовны на тему: «Совершенствование инструментария обеспечения качества инжекционного литья изделий из термопластичных полимеров».

Внедрение осуществлено в части применения методики конструкторско-технологической подготовки производства (КТПП) изделий из полимерных материалов методом инжекционного литья, учитывающей возможность оптимизации конструкции оснащения (пресс-форм) и технологических режимов на основе цифрового моделирования процесса литья.

Использование указанных результатов позволило **сократить трудоемкость КТПП в среднем на 15%**, повысить обоснованность проектных решений и улучшить качество подготовки производства изделий из термопластичных полимеров.

Директор

МП



Шнырь С. М. /

ПРИЛОЖЕНИЕ И

АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ООО «ЮМЗ»

Акт о внедрении результатов диссертационной работы «Совершенствование инструментария обеспечения качества инжекционного литья изделий из термопластичных полимеров»

Диссертационная работа Галкиной Н.В. посвящена решению актуальной научно-практической задачи — повышению качества изделий, получаемых методом литья под давлением из термопластичных полимеров. В процессе литья под давлением, особенно при изготовлении тонкостенных или геометрически сложных деталей, часто наблюдается нестабильность геометрических параметров готовой продукции. Это проявляется в виде коробления, неравномерной усадки, разнотолщинности, наличия внутренних напряжений и поверхностных дефектов. Подобные отклонения ведут к повышенному проценту брака, что, в свою очередь, увеличивает себестоимость продукции из-за перерасхода материала, дополнительных трудозатрат на контроль и переработку отходов, а также снижает общую конкурентоспособность предприятий на рынке.

Ключевая проблема заключается в несовершенстве существующих подходов к управлению качеством. Традиционные методы контроля и настройки технологических режимов, основанные на эмпирическом подборе параметров и линейных расчетах, зачастую требуют значительных временных затрат.

Для решения выявленных проблем в работе предлагается принципиально новый подход к повышению качества литья. Он основан на совершенствовании инструментария конструкторско-технологической подготовки процесса формообразования путем интеграции технологии «цифрового двойника».

В отличие от традиционных методов, разработанный подход предполагает создание виртуальной модели всего процесса литья, которая синхронизирована с реальным производственным оборудованием. «Цифровой двойник» аккумулирует в себе данные о геометрии изделия, свойствах конкретной партии материала, характеристиках термопластавтомата и оснастки.

Разработанная Галкиной Н.В. комплексная методика, реализованная в рамках этой цифровой среды, позволяет на этапе подготовки производства не просто прогнозировать, а с высокой точностью моделировать возникновение потенциальных дефектов (таких как воздушные ловушки, линии спая, зоны перегрева). На основе этих данных методика дает возможность проводить итеративную корректировку не только технологических параметров литья (температура по зонам цилиндра, профиль скорости впрыска, давление и

время выдержки, температура охлаждения), но и конструктивных параметров процесса (оптимизация литниковой системы, расположение точек впрыска, анализ вентиляции формы).

Такой комплексный подход обеспечивает минимизацию брака еще до физической реализации процесса, сокращает время наладки и позволяет адаптировать производство под конкретные условия, гарантируя стабильно высокое качество готовых изделий из термопластичных полимеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

Результаты диссертационной работы могут быть внедрены в практику ЮМЗ.

Руководитель конструкторско-технического отдела



Апалько Р.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ К
АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ АО «КРИОГЕНМАШ»



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО КРИОГЕННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ
(АО «КРИОГЕНМАШ»)
ИНН 5001000066 КПП 500101001
ОГРН 1025000513878 ОКПО 05747985

19.03.2026

№ 5

На № ____

от ____

г. 1

**Акт о внедрении результатов диссертационной работы «Совершенствование
инструментария обеспечения качества инжекционного литья изделий из
термопластичных полимеров»
на АО «Криогенмаш»**

г. Балашиха

«19» 03 2026г.

Настоящим актом подтверждается, что на АО «Криогенмаш» были рассмотрены результаты диссертационной работы «Совершенствование инструментария обеспечения качества инжекционного литья изделий из термопластичных полимеров». Диссертационная работа Галкиной Н.В., направленная на решение научно-практической задачи в области повышения качества изделий, получаемых методом литья под давлением из термопластичных полимеров, имеет важное значение. Это связано с тем, что в процессе производства наблюдается нестабильность геометрических параметров готовой продукции и повышенный процент брака, что увеличивает себестоимость и снижает конкурентоспособность изделий. Традиционные методы контроля и настройки технологических режимов зачастую требуют значительных временных затрат и не позволяют оперативно реагировать на изменение свойств сырья.

Предложен способ повышения качества литья изделий из полимерного материала за счет совершенствования инструментария конструкторско-технологической подготовки процесса формообразования с применением технологии «цифрового двойника». Разработанная Галкиной Н.В. комплексная методика позволит на этапе подготовки

производства более точно прогнозировать возникновение дефектов и корректировать технологические и конструктивные параметры процесса для их минимизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

Результаты диссертационной работы могут быть внедрены в практику АО «Криогенмаш» и использоваться в работах по созданию конкурентоспособных криогенных систем.

Главный конструктор
АО «Криогенмаш»

Шипов Д.Н.



ПРИЛОЖЕНИЕ Л
АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

Самарского университета

Гаврилов А.В.

2026 г.



АКТ

О внедрении результатов диссертационного исследования в учебный процесс

Результаты диссертационного исследования по теме «Совершенствование инструментария обеспечения качества инжекционного литья изделий из термопластических полимеров» выполненного на кафедре технологий производства двигателей, внедрены в учебный процесс на кафедре технологий производства двигателей на основании решения кафедры (протокол № 7 от 26.02.2026 г.)

Указанные результаты включены в курс учебной дисциплины «Технологические процессы в машиностроении», по направлению подготовки 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Заведующий кафедрой

д.т.н., доцент

/Хаймович А.И.

«13» марта 2026 г.

Соискатель ученой степени

/Галкина Н.В.

«13» марта 2026 г.

Начальник методического отдела
учебно-методического управления

к.т.н., доцент

/Вдовин Р.А.

«16» марта 2026 г.

Начальник отдела сопровождения
научных исследований

к.т.н., доцент

/Родионов Л.В.

«17» марта 2026 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ М
АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ В НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТАХ НОЦ
ГДИ-209 «ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ КРИОГЕННЫХ
СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ И РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ
ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ» В РАМКАХ ИСПОЛНЕНИЯ
ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗАДАНИЯ В СФЕРЕ НАУЧНОЙ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ (КОД ПРОЕКТА FSSS-2024-2017)

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор –
 проректор по науке
 _____ / Розенцвайг А.И.
 «16» марта 2026 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационного исследования
 в научно-исследовательских работах НОЦ ГДИ-209 «Исследование рабочих процессов
 криогенных систем накопления энергии и разработка способов повышения их
 эффективности» в рамках исполнения государственного задания в сфере научной
 деятельности (код проекта FSSS-2024-2017)

Результаты диссертационного исследования Галкиной Натальи Викторовны на тему «Совершенствование инструментария обеспечения качества инъекционного литья изделий из термопластичных полимеров», выполненного на кафедре технологий производства двигателей использованы в научно-исследовательской работе Научно-образовательного центра газодинамических исследований (НОЦ ГДИ-209) «Исследование рабочих процессов криогенных систем накопления энергии и разработка способов повышения их эффективности» в рамках исполнения государственного задания в сфере научной деятельности (код проекта №FSSS-2024-0017).

Указанные результаты использованы для проектирования и изготовления многокаскадной системы расширительных турбин. Разработанный инструмент многокритериальной оптимизации параметров инъекционного литья по цифровой модели на основе робастного планирования экспериментов Тагучи и серого реляционного анализа интегральных характеристик качества процесса формообразования обеспечил выбор оптимальных технологических параметров литья и рациональной конструкции пресс-формы корпусов многокаскадной системы расширительных турбин.

Начальник отдела сопровождения
 научных исследований,
 к.т.н., доцент
 _____ Родионов Л.В.
 «13» марта 2026 г.

Директор НОЦ ГДИ,
 к.т.н., доцент
 _____ Анисимов М.Ю.
 «16» марта 2026 г.

Соискатель учёной степени

_____ Галкина Н.В.
 «16» марта 2026 г.