

О.С. Тимофеева, Е.И. Яблочников

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА
ЦИФРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ
ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ
МАТЕРИАЛОВ**



**Санкт-Петербург
2022**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

О.С. Тимофеева, Е.И. Яблочников
ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА
ЦИФРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ
ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ
МАТЕРИАЛОВ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 12.04.01, 15.04.04
в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных
образовательных программ высшего образования магистратуры

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург
2022

Тимофеева О.С., Яблочников Е.И., Технологическая подготовка цифрового производства изделий из термопластичных полимерных материалов – СПб: Университет ИТМО, 2022. – 86 с.

Рецензент(ы):

Помпеев Кирилл Павлович, кандидат технических наук, доцент, доцент (квалификационная категория "ординарный доцент") факультета систем управления и робототехники, Университета ИТМО.

В учебном пособии рассматриваются методы и средства технологической подготовки производства изделий из термопластичных полимерных материалов литьем под давлением. Представлены используемые на различных этапах производственные и компьютерные технологии, показана целесообразность применения базовых средств автоматизации – CAD/CAM, CAE и PDM-систем. Рассматриваются вопросы организации единого информационного пространства при проведении технологической подготовки производства, создания интегрированной информационно-технологической среды. Представлены основные положения концепции «Цифровое литьевое производство», а также тенденции развития отрасли.



Университет ИТМО – национальный исследовательский университет, ведущий вуз России в области информационных, фотонных и биохимических технологий. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию – ICPC (единственный в мире семикратный чемпион), Google Code Jam, Facebook Hacker Cup, Яндекс.Алгоритм, Russian Code Cup, Topcoder Open и др. Приоритетные направления: IT, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication. Входит в ТОП-100 по направлению «Автоматизация и управление» Шанхайского предметного рейтинга (ARWU) и занимает 74 место в мире в британском предметном рейтинге QS по компьютерным наукам (Computer Science and Information Systems). С 2013 по 2020 гг. – лидер Проекта 5–100.

© Университет ИТМО, 2022
© Тимофеева О.С., Яблочников Е.И., 2022

Введение

Организация высокотехнологичных предприятий, деятельность которых связана с созданием глобально конкурентоспособной продукции, является одним из приоритетных направлений технологического развития Российской Федерации. Согласно Национальной технологической инициативе условием создания такой продукции является обязательное использование цифрового проектирования и моделирования, аддитивных технологий, а также информационных технологий для управления и сопровождения процессов подготовки производства [1].

Производство, которое функционирует на основе единой модели данных об объектах (изделиях), процессах и производственной системе, а также использует цифровые методы планирования, моделирования, мониторинга и управления производственными процессами, называют цифровым производством. Ключевой методологией создания интегрированных информационных систем промышленных предприятий является методология жизненного цикла изделий, основанная на использовании единого цифрового описания объектов производства, технологических процессов и ресурсов производственной системы.

Технологическая подготовка производства относится к одному из важнейших этапов жизненного цикла изделий. На этом этапе определяются необходимые ресурсы и возможные способы их использования для изготовления изделий с требуемым качеством и в заданные сроки при минимальных производственных затратах, что особенно актуально при единичном и мелкосерийном типе производства [2]. Способам повышения эффективности технологической подготовки производства посвящены работы многих отечественных специалистов: С. П. Митрофанова, Б.С. Падуна, В. Д. Цветкова, Д. Д. Куликова, Е.И. Яблочникова, А. В. Рыбакова, и других.

Одной из самых распространенных технологий переработки термопластичных полимерных материалов является технология литья под давлением, которая характеризуется высокой производительностью и низкой себестоимостью при производстве крупных партий изделий. Исследование данной технологии нашло отражение в работах Н.И. Басова, И.А. Барвинского [3], Э.Л. Калининцева, В.И. Филатова, В.Г. Дувидзона [4] и других. Среди зарубежных специалистов можно отметить Г. Менгеса [5], Д.О. Казмера [6], Р. Мэллоя, Т. Освальда [7] и др.

В современных рыночных условиях малые партии кастомизированных изделий имеют большой спрос, поэтому гибкость производственной системы, то есть скорость перехода с одного типа выпускаемой продукции на другой, является важнейшим экономическим показателем, характеризующим конкурентоспособность производственного предприятия.

В технологической подготовке литейного производства принимает участие большое количество квалифицированных специалистов, обладающих разными компетенциями и использующих различные программные системы, базы данных, технологическое оборудование. При этом очень важно обеспечить их тесное информационное взаимодействие, что возможно на основе использования единой информационно-технологической среды.

Длительность технологической подготовки литейного производства при изготовлении малых серий изделий превышает длительность самого процесса литья под давлением, что обуславливает необходимость совершенствования процесса. Большой потенциал может дать совместное использование передовых достижений в области разработки новых материалов, программного обеспечения для управления производственными процессами, компьютерного моделирования и аддитивных технологий.

Трудно представить хотя бы одну область человеческой деятельности, где бы для самых разнообразных целей не использовались изделия и детали из полимерных материалов. Конструкции современных приборов, как правило, содержат немало полимерных деталей, которые имеют ряд преимуществ перед металлическими аналогами: меньшую массу, свободу выбора конфигурации, текстуры и цвета. При этом вопросы изготовления деталей из пластмасс очень специфичны. Большое разнообразие геометрических форм и размеров деталей, требований к размерной точности и взаимному расположению поверхностей, широкая номенклатура применяемых полимерных материалов и связанные с этим различия технологических свойств требуют индивидуального подхода к проектированию специального технологического оснащения, поиска компромиссных и зачастую нетривиальных решений.

Вопросы, рассматриваемые в данном издании, соответствуют содержанию учебной дисциплины «Организация производственных процессов», реализуемой в рамках образовательной программы магистратуры «Цифровые технологии в производстве» по направлению подготовки 12.04.01 Приборостроение. Дисциплина направлена на формирование у обучающихся следующих компетенций: – осуществлять управление процессами организации производства; – организовывать исследование и разработку перспективных методов, моделей и механизмов организации и планирования производства. Учебное пособие может быть рекомендовано обучающимся в качестве конспекта по одному из разделов изучаемой дисциплины, в котором рассматриваются процессы организации и технологической подготовки литейного производства – одной из самых распространенных технологий производства изделий из пластмасс. В рамках каждого раздела рассмотрены базовые понятия, перечень вопросов для самоконтроля, необходимых для подготовки к зачету или экзамену по курсу, а также список литературы, рекомендованный для более глубокого изучения рассматриваемых вопросов.

1. Методы и средства решения задач технологической подготовки литьевого производства

1.1 Технологическая подготовка литьевого производства и используемые производственные технологии

По технологии литья под давлением производится более трети от общего объема изделий из полимерных материалов. В связи с высокой производительностью и относительно высокой стоимостью технологического оснащения эта технология в основном применяется при крупносерийном и массовом производстве изделий из термопластичных полимерных материалов (ТПМ).

Грамотно спроектированная и качественно изготовленная литьевая форма позволяет обеспечить требуемые точность размеров и шероховатость поверхности отливаемых деталей, а также сохранить физико-механические свойства полимерного материала и сформировать деталь с минимальными остаточными напряжениями (отсутствием коробления). Выполнение указанных требований должно сочетаться с обеспечением минимальной себестоимости изделия, что может быть достигнуто выбором оптимальной гнздности литьевой формы и такой ее конструкции, которая позволит исключить необходимость постобработки изделия (в том числе удаления литниковой системы) и обеспечить возможность работы литьевой машины в автоматическом режиме.

Литье под давлением – технологический процесс переработки пластмасс, который включает в себя следующие этапы:

- загрузка гранулированного полимерного материала из загрузочного бункера сырья в зону загрузки материального цилиндра литьевой машины;
- нагрев и шнековая пластикация сырья (путем перемешивания), при которой осуществляется переход исходного материала (гранул) в вязкотекучее (близкое к жидкому) состояние;
- набор необходимой дозы расплавленного полимерного материала и его впрыск (инжекция) под давлением в закрытую литьевую форму;
- выдержка расплава под давлением в литьевой форме и охлаждение отливки, раскрытие формы;
- извлечение отливки из литьевой формы системой выталкивания.

Сырье для литья под давлением представляет собой гранулы термопластичных полимерных материалов (ТПМ), обладающих широким диапазоном механических и физических свойств. *Термопластичные* материалы сохраняют способность к повторной переработке после формования, в отличие от *термореактивных* материалов, которые при переработке претерпевают необратимые химические изменения, приводящие к образованию неплавкого и нерастворимого материала.

Литье пластмасс под давлением осуществляется на специальном технологическом оборудовании – литьевых машинах – *термопластавтоматах* (ТПА). Термопластавтоматы могут быть классифицированы по следующим признакам:

- по расположению узла впрыска: вертикальные (впрыск материала производится вертикально вниз, плоскость разъема расположена горизонтально); горизонтальные (горизонтальный впрыск материала, вертикальное расположение плоскости разъема);

- по количеству используемых материалов: для однокомпонентного литья; для многокомпонентного литья;

- по типу привода: электрические и гидравлические.

Кроме представленных, существуют также и другие классификации.

Целью технологической подготовки производства (ТПП) является оптимальное по срокам и ресурсам обеспечение готовности производства к изготовлению изделий. Организация ТПП связана с формированием структуры и подготовкой информационного, математического и технического обеспечения, необходимого для выполнения функций ТПП [8]. Помимо формирования определяющих (принципиальных) технологических и организационных решений по производству изделий, технологическая подготовка литьевого производства включает в себя своевременное обеспечение производства средствами технологического оснащения [9,10].

Основными задачами технологической подготовки литьевого производства являются:

- анализ технологичности будущего полимерного изделия, включающий изучение конструктивных особенностей не только с точки зрения выполнения готовым изделием его функций, но и со стороны физики процесса литья;

- выбор соответствующего полимерного материала с учетом эксплуатационных требований к изделию и возможных параметров его переработки;

- выбор типоразмеров литьевого и периферийного оборудования и дополнительного оснащения литьевого производства;

- проектирование и изготовление формообразующей оснастки – литьевой формы;

- определение оптимальных режимов процесса литья в допустимом диапазоне – окне переработки (*molding window*);

- оптимизация уровня автоматизации процесса производства (съем готовых изделий, транспортировка, удаление литниковой системы, контроль, упаковка).

Технологическая подготовка литьевого производства включает также получение опытных образцов отливаемых изделий. Это требует осуществления процессов проектирования, изготовления, контроля, сборки и установки литьевой

формы на термопластавтомат (ТПА), подготовки полимерного материала (сушки в соответствии с предоставляемыми производителем режимами), литья изделий и их контроля для установления соответствия параметров изделия требованиям технологической документации. После контроля опытных образцов изделий может потребоваться доработка формообразующих деталей (ФОД) литьевой формы, а в ряде случаев и повторное изготовление ФОД после внесения необходимых изменений в конструкцию. Таким образом, самым длительным этапом технологической подготовки литьевого производства является проектирование и изготовление литьевой формы, а, соответственно, и стоимость этого этапа составляет основную часть всей стоимости ТПП.

Множество взаимосвязанных задач, требующих решения в процессе технологической подготовки литьевого производства, определяет сложность предварительной оценки длительности и стоимости ТПП. Анализ состояния отечественных производственных предприятий, деятельность которых связана с проектированием и изготовлением литьевых форм, показал, что длительность ТПП может составлять от 10 до 20 недель. Основными причинами невыполнения заказа по изготовлению литьевой формы в намеченный срок, как правило, являются: производственный брак, неправильная предварительная оценка сроков и необходимость внесения изменений в конструкторскую документацию. Внесение изменений требуется почти в 50% случаев при сборке и/или после испытаний литьевых форм, что увеличивает сроки изготовления литьевых форм вплоть до 100% [11]. Для сокращения длительности процесса проектирования и изготовления литьевых форм необходимо обеспечить повышение качества взаимодействия специалистов (повысить интенсивность и ответственность), обладающих различными компетенциями, использующих современное программное обеспечение и технологическое оборудование, а также применять новые производственные технологии.

Указанные в техническом задании (ТЗ) требования к точности размеров, качеству поверхностей, внешнему виду изделий и их эксплуатационным свойствам, а также требуемая серийность производства оказывают значительное влияние на процесс проектирования литьевых форм. С учетом этих факторов выбирается тип литниковой системы, количество и расположение мест впрыска расплава полимерного материала, конфигурация системы охлаждения, количество и положение толкателей, определяется кинематика литьевой формы и геометрия формообразующих деталей. В свою очередь, это определяет состав технологического оборудования и режущего инструмента, то есть определяет требования к организации подразделений инструментального производства.

При изготовлении литьевых форм применяют различные производственные технологии механообработки: точение, сверление, фрезерование и электроэрозионную обработку (ЭЭО) для удаления основного количества

материала, а также тонкое шлифование, полирование и доводку для финишной обработки поверхностей формообразующих деталей.

Производство одного и того же изделия может осуществляться с использованием различных технологий, поэтому необходимо проводить анализ затрат, который предусматривает сравнение вариантов изготовления, обеспечивающих решение одинаковых задач в конкретных производственных условиях. Сокращение длительности изготовления литейной формы – одна из главных целей ТПП, поэтому производители зачастую используют современные технологии объемного и высокоскоростного фрезерования. Производительность ЭЭО, как правило, значительно уступает производительности процесса фрезерования, поэтому изготовители литейных форм стремятся к максимально возможному удалению материала с использованием технологий резания. Кроме того, ЭЭО, при принятии решения о необходимости ее включения в технологический процесс, требует изготовления специальных инструментов – электродов, геометрия которых соответствует геометрии прожигаемой полости с учетом величины необходимого искрового зазора. Однако данная технология применяется при изготовлении литейных форм, так как существует ряд конструктивных элементов деталей приборов, которые возможно изготовить только с использованием ЭЭО: тонкие глубокие пазы, прямые углы, определённые виды текстуры поверхности и др.

Заключительными операциями изготовления ФОД литейных форм являются финишные (отделочные) операции, связанные с повышением качества поверхностей, контактирующих с расплавом ТПМ. В целях повышения полируемости поверхностей формообразующих деталей и их стойкости к истиранию при эксплуатации литейных форм производят соответствующую термическую обработку.

Как правило, ФОД литейных форм имеют сложную геометрию, что обуславливает сложность их контроля традиционными измерительными средствами. Необходимость технологических уклонов с целью облегчения извлечения отлитых полимерных изделий из литейной формы и увеличение объема формующей полости на размер усадки полимерного материала в процессе охлаждения расплава для получения готовых изделий требуемой размерной точности преобразует типовые геометрические элементы конструкции изделия в сложноконтролируемые. В связи с этим в процессе контроля геометрии формующих полостей литейных форм целесообразно использовать современные средства измерения, такие как координатно-измерительные машины (КИМ) и оптические сканеры. Применение этих средств измерений позволяет не только автоматизировать процесс контроля, но и избежать погрешностей измерений, связанных со сложностью методик контроля с использованием традиционных средств и «человеческим фактором». При этом контроль может быть реализован

как на обрабатывающих центрах без съема формообразующей детали, так и на специальных измерительных участках.

Заключительным этапом изготовления литьевой формы является ее сборка и проведение приёмо-сдаточных испытаний. После проверки работоспособности подвижных элементов литьевой формы производят пробное литье изделий с целью проверки соответствия полученных полимерных изделий требованиям конструкторской документации. Подготовка к испытаниям литьевой формы включает: сушку гранул требуемого для изготовления ТПМ, согласно спецификации на материал, установку на ТПА литьевой формы, подключение её системы охлаждения к линии термостатирования, настройку системы выталкивания и пр., загрузку высушенного материала в бункер ТПА и настройку режимов литья.

После извлечения отливки из литьевой формы, необходимо отделить литники, которые могут составлять значительную часть объема отливки, особенно в многогнездных литьевых формах. В зависимости от местоположения впускных литников и конфигурации полимерных изделий могут применяться различные конструкции литниковой системы: может быть предусмотрено автоматическое отделение литников при извлечении отливки – туннельные литники или безлитниковое литье при использовании горячеканальных систем (ГКС).

Таким образом при ТПП изделий из термопластичных полимерных материалов формируется множество технологических данных, предназначенных для описания технологических процессов как в литьевом (ЛП), так и в инструментальном (ИП) производствах:

- технологический процесс изготовления деталей литьевой формы (ИП);
- технологический процесс изготовления электродов (ИП);
- технологический процесс сборки литьевой формы (ИП);
- технологический процесс подготовки полимерного сырья (ЛП);
- технологический процесс литья под давлением (ЛП);
- технологический процесс удаления литников (ЛП);
- технологический процесс контроля и испытаний готового полимерного изделия (ЛП или ИП).

Большое количество формируемой технологической информации требует обязательного рассмотрения вопроса ее взаимосвязанного хранения с целью поиска уже реализованных процессов и их повторного выполнения после адаптации под конкретную производственную ситуацию.

Современное производство изделий из полимерных материалов, характеризующееся меняющимся спросом и растущей индивидуализацией изделий, в том числе в сфере приборостроения, должно иметь возможность

быстрого перехода с одного типа выпускаемой продукции на другой. Одним из способов решения данной проблемы может быть применение *быстропереналаживаемых литевых форм* (ПЛФ) с комплектом сменных ФОД с низкой трудоемкостью изготовления [12].

Переналаживаемая литевая форма представляет собой сборочную единицу, которая состоит из набора плит для определенного типа литьевого оборудования и специальных сменных формообразующих деталей (матрицы и пуансона), в формующих полостях которых и происходит превращение расплава полимерного материала в изделие при его охлаждении. Проектирование и изготовление только сменных ФОД при неизменной общей конструкции литевой формы позволяет значительно сократить ТПП при переходе с одного типа выпускаемой продукции на другой.

Для формирования группы изделий, изготовление которых возможно с использованием конкретной ПЛФ, необходимо проведение анализа номенклатуры выпускаемой продукции предприятия с использованием методов и принципов групповой технологии [13].

Автоматизировать процесс принятия решения о выборе ПЛФ можно за счет разработки и применения *алгоритма адресации*. Под алгоритмом адресации понимается алгоритм отнесения изделия к группе изделий на основе набора параметров: материал полимерного изделия; объем и габаритные размеры изделия; расположение и количество плоскостей разъема и др.

3D-модель ПЛФ с комплектом заготовок для изготовления сменных ФОД (матрицы и пуансона) представлена на рисунке 1.

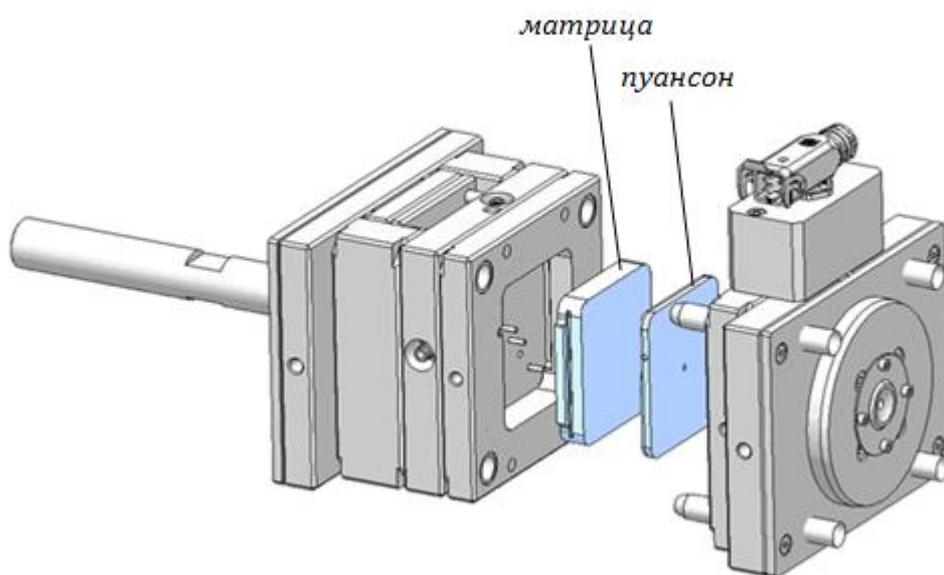


Рисунок 1 – 3D модель переналаживаемой литевой формы (построена в системе Cimatron)

ПЛФ проектируется для группы изделий из полимерных материалов, но также имеет ограничения, описываемые параметрами, определяющими возможность ее применения на конкретном ТПА (размер плит литевой формы, закрытая высота формы и максимальный объем расплава). Параметры ПЛФ можно условно разделить на две группы: параметры, описывающие конструктивную (геометрическую) связь с ТПА и параметры, ограничивающие группу изделий (диапазоны значений объемов и габаритных размеров). Поэтому при поступлении заказа на изготовление нового изделия и применении алгоритма адресации нового изделия к имеющимся ПЛФ автоматически может производиться формирование перечня требований к параметрам ТПА, согласно структуре, представленной на рисунке 2. На основе этих требований производится поиск в базе данных оборудования предприятия.

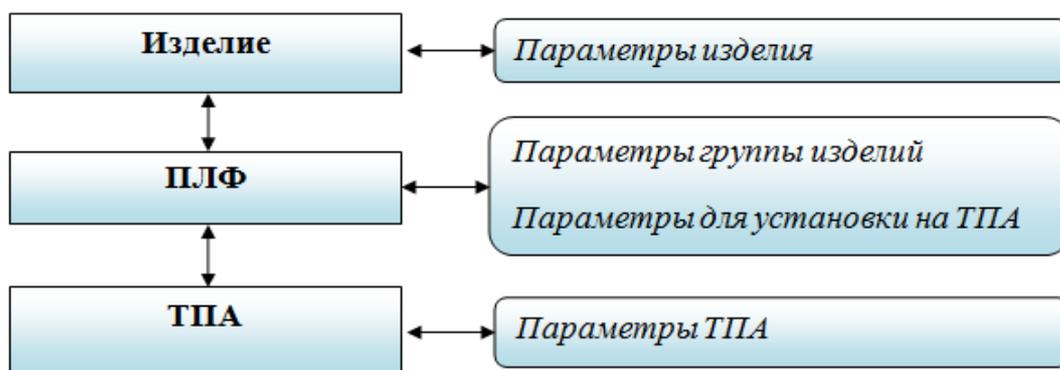


Рисунок 2 – Связь параметров полимерного изделия с параметрами ТПА через параметры ПЛФ

Применение ПЛФ и изготовление только сменного комплекта ФОД при технологической подготовке литьевого производства позволяет сократить длительность этапов, связанных не только с проектированием и изготовлением литьевых форм, но и с переходом к изготовлению нового изделия, когда достаточно заменить в имеющейся литевой форме только комплект ФОД и, при необходимости, доработать плиты под толкатели.

С целью изучения процессов изготовления полимерных изделий литьем под давлением из новых материалов или для проверки и отработки новых технологий литья на базе предприятий, ориентированных на литьевое производство изделий, организуют исследовательские лаборатории. Для изготовления малых серий изделий («пилотных», опытных) также является целесообразным использование ПЛФ.

При ТПП малых серий полимерных изделий литьем под давлением возрастают требования к сокращению сроков и стоимости изготовления ФОД, но

одновременно понижаются требования к необходимой стойкости комплекта ФОД, то есть к количеству циклов, которые он должен выдержать без износа или поломки. Стойкость стальных ФОД для изготовления малых серий полимерных изделий, как правило, избыточна, а трудоемкость их изготовления непомерно высока. Следовательно, при мелкосерийном типе производства целесообразным будет рассмотрение возможности применения более производительных технологий изготовления ФОД [14], а также применения для их производства полимерных материалов [15], обладающих необходимой термостойкостью и прочностью, достаточной для получения малых серий изделий.

В настоящее время понятие «гибкости производственной системы», позволяющее быстро переконфигурировать процессы под новый тип продукции, тесно связано с аддитивными технологиями, по-прежнему относящимися к классу развивающихся производственных технологий. Аддитивные технологии (АТ) стали неотъемлемой частью ТПП в области переработки полимеров для изготовления прототипов изделий, а также являются весьма перспективными для изготовления металлических формообразующих деталей с конформными системами охлаждения. *Конформные системы охлаждения* – это каналы, эквидистантно повторяющие конфигурацию формирующей полости литейной формы, что позволяет за счет более равномерного и эффективного охлаждения отливки уменьшить брак при литье и сократить время цикла литья. Изготовление конформных каналов охлаждения, как правило, не может быть реализовано традиционными способами механической обработки из-за сложности их геометрии (криволинейный профиль оси канала, сужение и расширение профиля сечения и пр.). В условиях организации мелкосерийного производства сокращение времени цикла не всегда является первоочередной задачей, а изготовление ФОД из металлов может быть неоправданно затратным [16].

Ведущие компании – производители аддитивного оборудования, такие как 3DSystems и Stratasys (США), EOS (Германия) и др., рассматривают возможность применения новых композиционных термостойких полимерных материалов, способных выдерживать кратковременные высокие тепловые нагрузки в качестве материалов ФОД литейных форм. Развитие аддитивных технологий в направлении повышения точности печати также позволяет считать эти технологии конкурентными традиционным. Однако достижимая размерная точность и качество поверхностей таких деталей, что связано с особенностями процесса трехмерной печати, требуют включения в процесс изготовления полимерных ФОД этапа постобработки с учетом свойств используемого полимерного материала.

Трудоемкость механообработки при изготовлении формообразующих деталей из полимерных материалов существенно ниже, чем трудоемкость изготовления аналогичных деталей из сталей. По экспертной оценке специалистов, работающих в данной области [17], трудоемкость изготовления

стальной детали в 2-2,5 раза превышает трудоемкость изготовления такой же детали из алюминиевого сплава и в 5-6 раз превышает трудоемкость ее изготовления из полимерного материала.

Полимерные композиционные материалы, применяемые для изготовления ФОД с использованием аддитивных технологий, как и любые полимерные материалы, обладают низкой теплопроводностью, что делает нецелесообразным изготовление в них каналов охлаждения. Каналы охлаждения не могут эффективно отводить тепло от расплава, при этом прочность ФОД при наличии каналов существенно уменьшится, так как канал охлаждения станет концентратором напряжений и при литье такие ФОД могут растрескаться. Низкая теплопроводность увеличивает время застывания расплава в формирующей полости, усадка кристаллического полимерного материала в изделии увеличится, что следует учитывать при проектировании.

В настоящий момент ведутся исследования, связанные с использованием полимерных формообразующих деталей (сменных вставок) в литьевые формы [18, 19] с целью описания области их возможного применения и ограничений. При этом применение аддитивных технологий предоставляет производителям практически неограниченную гибкость, особенно когда они реализуются в дополнение к традиционным производственным технологиям, что крайне важно для успеха приборостроительных предприятий, но требует проведения комплекса исследований.

1.2 Технологическая подготовка литьевого производства и используемые компьютерные технологии

В технологической подготовке литьевого производства принимают участие специалисты смежных областей: конструкторы полимерных изделий, материаловеды, специалисты в области инженерного анализа, конструкторы литьевых форм, технологи инструментального и литьевого производств, программисты оборудования с ЧПУ (производственного и измерительного), специалисты по материально-техническому обеспечению процессов и пр. Для совместной работы такого количества участников процесса, принимающих множество взаимосвязанных или взаимоисключающих конструкторско-технологических решений, обязательно наличие *единого информационного пространства* (ЕИП), ключевой системой для реализации которого является PDM-система (Product Data Management) [20, 21]. Из отечественных программных продуктов здесь можно отметить компании АСКОН и Top-системы.

Компания АСКОН [22] предлагает комплексное решение по созданию единого информационного пространства (ЕИП) для всех участников жизненного

цикла изделия на основе его полного электронного описания, что позволяет предприятиям оптимизировать бизнес-процессы, повышать качество выпускаемой продукции и, соответственно, повышать конкурентоспособность.

Платформа (комплекс программ), предлагаемая компанией Топ-системы [23], дает возможность организовать единую среду конструкторского и технологического проектирования, а также подготовки производства. Открытость данной платформы обеспечивает возможность расширения комплекса и создания собственных информационных систем в рамках ЕИП предприятия.

Проектирование и изготовление литьевых форм, как уже говорилось, сопровождается, и зачастую неоднократно, внесением инженерных изменений в конструкцию полимерного изделия или конструкцию литьевой формы, в том числе в конструкцию ФОД. Необходимым инструментом, позволяющим упростить этот процесс, является CAD/CAM-система (Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing), позволяющая автоматизировать процессы проектирования изделий и разработки управляющих программ для оборудования с ЧПУ. Сложность процессов, происходящих с расплавом полимерного материала в формирующей полости литьевой формы во время цикла литья, обуславливает также необходимость применения CAE-систем (Computer Aided Engineering). Трехмерное моделирование изделий и имитационное моделирование процессов литья являются ключевыми технологиями для получения изделий требуемого качества.

Интеграция CAD/CAM/CAE и PDM-систем позволяет не просто использовать набор эффективных специализированных САПР-модулей, а организовывать процессы подготовки производства в целом, улучшая взаимодействие при выполнении проектов. Применение технологии Workflow (управления потоком работ) весьма эффективно при типовой последовательности действий, реализуемой в технологической подготовке литьевого производства группой специалистов: моделирование, анализ, оценка результатов, изменение модели, анализ, оценка результатов, утверждение. Процесс ТПП характеризуется сложностью точного предсказания времени окончания процесса и количества необходимых итераций. Формирование типовой структуры выполняемого проекта в PDM-системе, в соответствии с моделью данных «Продукт – Процесс – Ресурс», с учетом версионности моделей продуктов и моделей процессов, может быть эффективно реализовано с использованием технологии Workflow.

В настоящее время существует большое количество CAD/CAM-систем, отличающихся по функциональным возможностям, сложности освоения, а также стоимости. Наиболее распространенными в мире являются CATIA (Dassault Systèmes, Франция), NX (Siemens PLM Software, США), PowerShape/PowerMill (AutoDesk, США), Cimatron (Cimatron Ltd., Израиль), TopSolid (Missler Software, Франция).

К CAD/CAM-системе, используемой при технологической подготовке литейного производства, предъявляется ряд требований:

- наличие собственной развитой системы геометрического моделирования и возможность приема моделей любых форматов из других CAD-систем с возможностью «лечения» геометрии;

- наличие инструментов специализированного геометрического анализа 3D-модели с учетом специфики технологии литья под давлением и особенностей конструирования полимерных изделий;

- автоматическое создание линий разреза и генерация формообразующих поверхностей матрицы и пуансона на основе 3D-модели отливки;

- наличие каталогов стандартных элементов литейных форм с возможностью создавать собственные каталоги и сборки (для использования в процессе проектирования 3D-моделей уже имеющихся в наличии ПЛФ).

Эффективность применения систем автоматизированного проектирования многократно повышается при использовании систем, ориентированных на процессы, а не на решение отдельных задач. Как показал анализ, такой процессно-ориентированной системой, специализирующейся на проектировании сложной технологической оснастки и инструмента (литейных форм, штампов и электродов) является признанная за рубежом и в России предприятиями индустрии переработки пластмасс CAD/CAM-система Cimatron [24]. Среди ведущих компаний, использующих данную систему, можно выделить BasTech (США), LS Mold и Jamesway (Нидерланды), Ju Teng (Китай), Omron (Япония) и др.

Для анализа технологичности полимерного изделия, наряду с типовыми инструментами моделирования, позволяющими оценить разнотолщинность, объем, массу и площадь проекции изделия, система Cimatron имеет и специальные средства, такие как: быстрый расчет линий и поверхностей разреза, генерацию формообразующих поверхностей с анимацией перемещения формообразующих деталей, цветовую визуализацию поднутрений и углов уклона относительно заданных направлений разреза и пр.

Для сокращения сроков проектирования литейных форм CAD/CAM Cimatron содержит библиотеки стандартных деталей литейных форм: Hasco, DME, Fodesko и др. Эти библиотеки могут дополняться и корректироваться конструкторами литейных форм в соответствии с собственными стандартами предприятий.

CAD/CAM Cimatron использует единую интегрированную информационную модель «изделие – формообразующая оснастка», представленную на рисунке 3, что позволяет оптимизировать процессы проектирования, быстро вносить изменения во все связанные этапы изготовления продукции от проекта до производства. Для каждой детали сборки может быть при необходимости

сформирована конструкторская документация (КД) в виде чертежа и разработана управляющая программа (УП) ее изготовления на станке с ЧПУ.

Возможность параллельного выполнения ряда технологических задач, таких как проектирование ФОД и проектирование ЛФ, а также разработка УП, значительно сокращает время подготовки производства, а наличие ассоциативных связей между моделями позволяет, в случае необходимости внесения инженерных изменений, быстро произвести перерасчет.

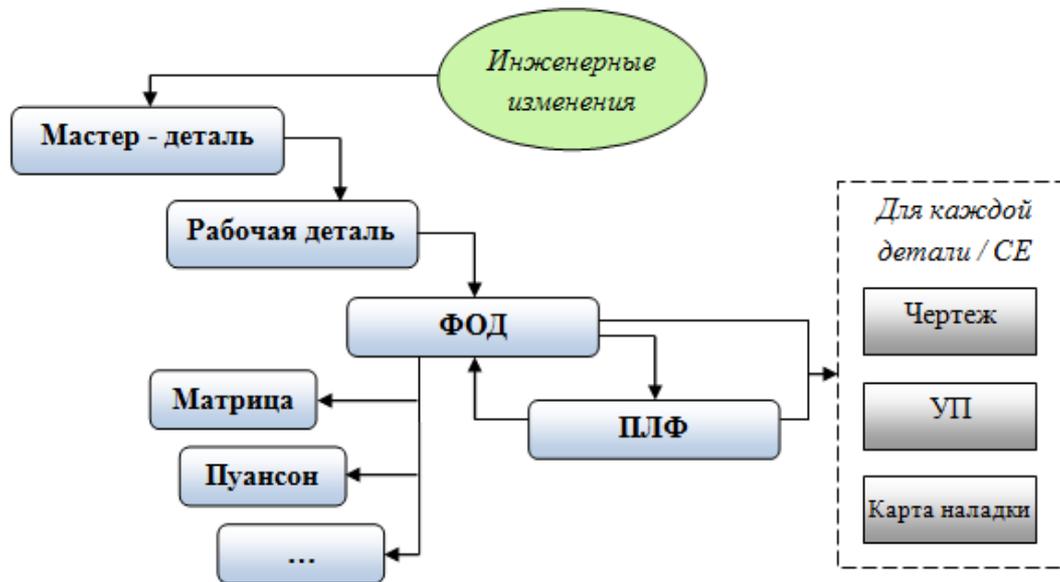


Рисунок 3 – Схема процесса разработки моделей и документов в CAD/CAM Cimatron

На основе информации о программе производства изделий (шт./год), объеме впрыска имеющегося литейного оборудования (см^3) и максимально возможной себестоимости отливаемого изделия (руб./шт.) определяется гнездность литейной формы [25]. Расчет экономической целесообразности изготовления многоместной формы является обязательным, так как с увеличением числа гнезд увеличивается трудоёмкость ее изготовления, обслуживания и ремонта.

Проектирование многоместных литейных форм также эффективно реализуемо средствами САД-систем. При принятии решения об изготовлении многоместной литейной формы на основе типовых схем расположения разводящих литников, позволяющих обеспечить равномерное заполнение расплавом всех формующих полостей, производится копирование трехмерных моделей. Для связи полимерных изделий в одну отливку моделируется литниковая система. На основе модели отливки определяются формообразующие поверхности пуансона и матрицы, а также габариты ФОД.

При освоении функциональных возможностей CAD/CAM-системы, за счет автоматизации решения отдельных задач, а также возможности параллельного выполнения этапов проектирования, что может быть реализовано за счет организации единого информационного пространства, длительность процесса проектирования литейной формы может быть сокращена до 50%.

Длительность проектирования литейной формы средней сложности с последовательным (а) и параллельным выполнением отдельных этапов в CAD/CAM-системе (б) представлена на рисунке 4 в виде диаграмм Ганта.

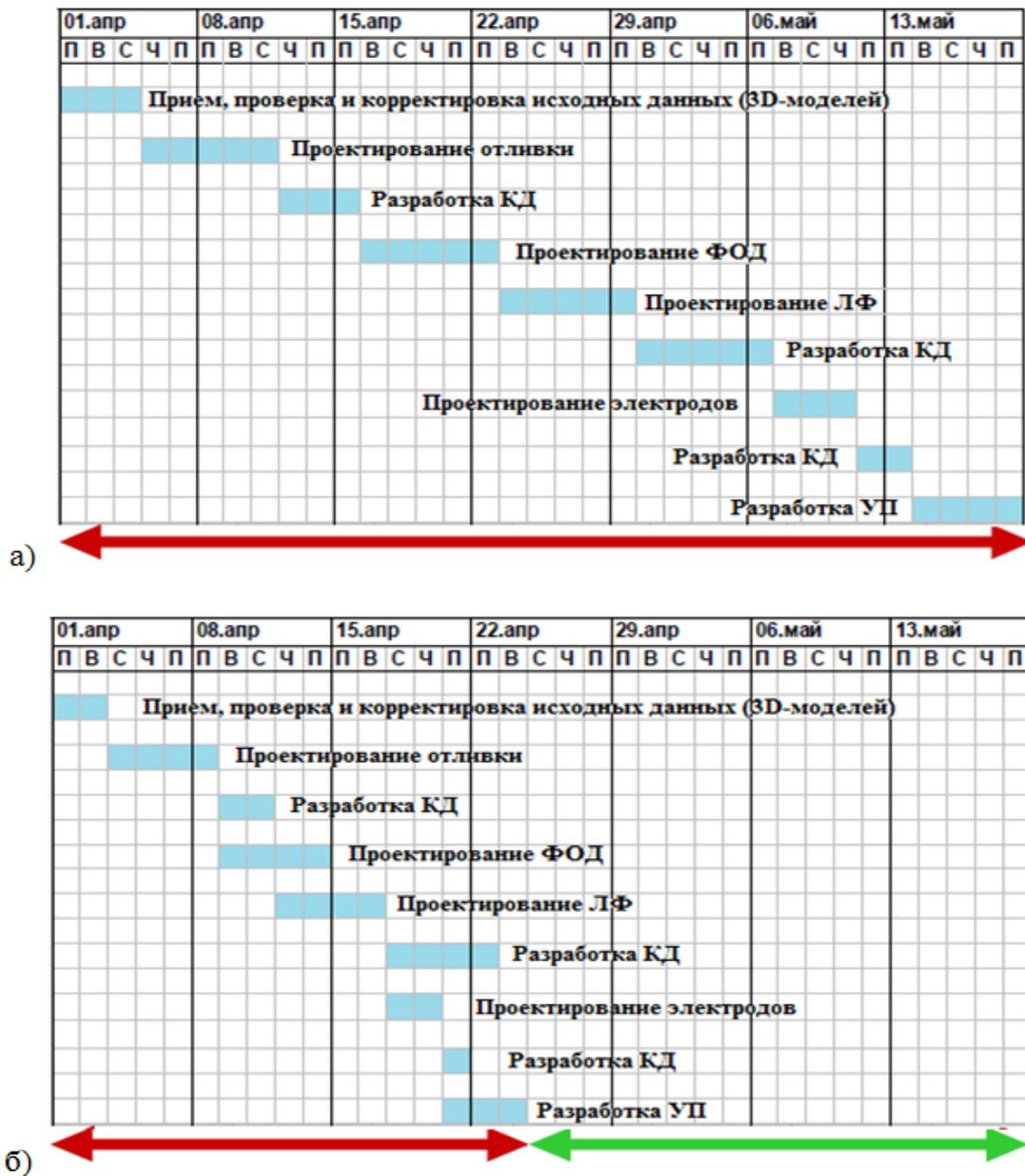


Рисунок 4 – Длительность проектирования: последовательное выполнение задач (а); параллельное выполнение задач (б)

«Правильность» конструирования отливки (модели полимерного изделия с литниками) и взаимосвязанных моделей комплекта ФОД, как правило, можно оценить только после проведения испытаний, при которых могут быть выявлены недостатки конструкции. Такой подход (натурные испытания) является весьма затратным, так как может требовать многократных доработок. Совокупность большого количества параметров, как конструктивных, так и технологических, а также сложность самого процесса литья под давлением обуславливает обязательное проведение виртуальных испытаний в виде применения CAE-систем для имитационного моделирования литьевого процесса [26].

В настоящее время на рынке программного обеспечения для решения задач имитационного моделирования процесса литья под давлением представлено множество продуктов, среди которых, реализующих 3D-метод анализа, являющийся стандартом отрасли [27], можно выделить: REM3D (Transvalor S.A, Франция), VISI Flow (Vero USA, Inc., США), Sigmasoft (SIGMA Engineering GmbH, Германия), Moldex3D (CoreTech System, Тайвань) и 3D TIMON (Toray Engineering Co., Япония).

Применение систем моделирования процесса литья под давлением на этапе подготовки литьевого производства позволяет спрогнозировать возможные дефекты полимерного изделия и выявить способы их устранения путем изменения конструкции литниковой системы и положения точек впрыска, изменения параметров процесса, то есть оптимизировать конструкцию литьевой формы еще до проведения натурных испытаний.

Классический процесс инженерного анализа состоит из трех этапов: этап предварительной обработки (создание расчетной модели), этап вычислений и этап обработки результатов. Большую часть времени, необходимого для реализации этого процесса, занимает этап создания расчетной модели. Использование данных симуляции в соответствии со стандартизованным и структурированным форматом, основанном на подходе управления жизненным циклом моделирования, позволяет повторно использовать расчетные модели. При этом следует отметить, что обработка результатов анализа также является весьма нетривиальной задачей и требует участия специалиста высокого класса.

Загрузка трехмерной модели отливки в CAE-систему производится в формате stl. Модель предварительно создается в CAD-системе, и формируется конечно-элементная сетка. Точность расчета CAE-системы зависит от применяемого типа конечно-элементной сетки, размера и количества элементов. Эффективным подходом сокращения количества элементов сетки при сохранении точности расчета является применение неравномерных и комбинированных сеток, что реализовано в системе Moldex3D [28]. Эта система является исключительно трехмерной профессиональной системой инженерного анализа для моделирования процесса литья под давлением. Среди крупнейших пользователей системы можно отметить: Canon и Nissan (Япония), Samsung

Electronics и LG (Корея), Asus (Тайвань), Logitech (Швейцария), Bosh и Osram (Германия), Sony Ericsson (Япония-Швеция), Lego (Дания), Volvo (Швеция) и др.

Для моделирования процесса литья под давлением в системе Moldex3D применяются расчетные модели, основанные на теории физики полимеров, динамике жидкостей и механике материалов. Итеративный поиск оптимальной конструкции литьевой формы и параметров процесса, осуществляемый с использованием средств имитационного моделирования, позволяет значительно сократить количество натуральных испытаний, а, возможно, и вовсе исключить необходимость переделки готового комплекта ФОД (рисунок 5).



Рисунок 5 – Итерационный процесс поиска конструкторского решения

Исходными данными для расчета является комплекс 3D-моделей отливки, комплекта ФОД и литьевой формы, математические модели их материалов, характеристики ТПА и параметры процесса. База материалов Moldex3D содержит более 7000 термопластичных полимерных материалов и материалов литьевых форм, как правило, металлов. Для анализа процесса, происходящего с использованием полимерных ФОД, требуется информационное взаимодействие разработчиков данных материалов и разработчиков САЕ-системы с целью передачи в базу данных математических моделей таких материалов. На данный момент количество полимерных материалов, которые могут быть использованы для изготовления ФОД литьевых форм, в базах данных САЕ-систем крайне ограничено. Также удобной для пользователей является возможность системы задавать параметры процесса, используя интерфейс стойки ЧПУ литьевого оборудования, которое предполагается использовать в реальном процессе. Система содержит большую базу ТПА и их характеристик, но в настоящий момент не для всех моделей оборудования присутствуют модели стоек ЧПУ. Следовательно, также необходимо сотрудничество между производителями литьевых машин и разработчиками САЕ-систем.

Эффект от применения CAE-систем при подготовке литейного производства очевиден, однако малые и средние предприятия могут находиться в состоянии ограниченного бюджета или ограниченных аппаратных средств. Использование облачного расширения Moldex3D, основанного на Веб-сервисе Amazon (AWS), гарантирующем стабильность и безопасность эксплуатации, позволяет переносить «тяжелые» рабочие расчеты моделирования в облако и выполнять несколько анализов одновременно, не приобретая дополнительных лицензий и оборудования. Таким образом, облачное расширение Moldex3D позволяет управлять качеством изделий и производственным планированием при ограниченных ресурсах, времени и бюджете.

Для полноты описания информационной модели проектируемых процессов производства может также применяться имитационное моделирование уровня технологического процесса, включающего как основные операции, связанные с формированием отливки, так и вспомогательные (контроль, транспортировка и пр.). Такая модель позволяет отрабатывать в виртуальной среде алгоритмы взаимодействия участвующих в рамках процессов устройств, а также перейти к верхнему уровню моделирования – моделированию производственных процессов.

Имитационное моделирование литейного участка (цеха литья пластмасс), позволяет эффективно размещать новое литейное и периферийное оборудование, транспортные линии для автоматического материального обеспечения литейного производства сырьем или для перемещения крупногабаритных литейных форм, перемещения роботов, планировать габариты рабочих зон для перемещения людей между рабочими местами с целью повышения их безопасности и пр. Такие модели могут быть разработаны, например, в программном комплексе DELMIA (3D EXPERIENCE) [29].

Применение комплекса цифровых технологий CAD/CAM/CAE при подготовке литейного производства, использование PDM для управления потоком работ и информационного взаимодействия всех участников процесса, использование специализированных программных продуктов, предназначенных для различного типа моделирования (объектов производства, процессов производства и производственных систем), а также для управления данными и процессами, при комплексном их использовании способствует созданию системы взаимосвязанных компьютерных моделей, что позволяет повысить эффективность и сократить длительность технологической подготовки литейного производства.

1.3 Цифровое литьевое производство как тенденция развития полимерной отрасли

Как уже говорилось, цифровое производство, которое функционирует на основе единой модели данных об объектах (изделиях), процессах и производственной системе, а также использует цифровые методы планирования, моделирования, мониторинга и управления производством – это неотъемлемая форма организации современного конкурентоспособного производственного предприятия. Стремительно развивающиеся производственные и информационные технологии предоставляют новые возможности организации производственных процессов.

Индустрия 4.0, концепция которой в настоящее время широко обсуждается как научными организациями, так и промышленными предприятиями, является производственной парадигмой, призванной объединить в интегрированную сеть оборудование, программные системы, объекты производства и процессы, связывая с помощью технологий киберфизических систем (КФС) физический и виртуальный мир. Одной из ключевых задач этой новой парадигмы является создание «Умных производств» («Smart Factory»), являющихся самообучаемыми и самоорганизующимися. Все объекты такой производственной системы должны быть интегрированы и непрерывно обмениваться информацией (англ. *interoperability* – способность к взаимодействию), самоидентифицируясь и контролируя свое текущее состояние, что позволит создавать «Умные процессы» («Smart Process»). Такие «Умные производства» будут создавать новый тип продукции, путем преобразования «Умной заготовки» («Smart Workpiece») в «Умный продукт» («Smart Product»).

«Умная заготовка» должна быть интегрирована с процессом своего производства и активно поддерживать его, контролируя выполнение каждого этапа, основываясь на знаниях о технологических параметрах, которые должны использоваться, и предоставляя информацию в производственную систему о своем состоянии в течение всего жизненного цикла.

«Умный продукт» должен быть способен к самоидентификации и предоставлять информацию о каждом этапе своего создания, сохраняя информацию о предыдущих и предоставляя информацию о дальнейших этапах: эксплуатации и технического обслуживания. Следовательно, такой продукт может быть представлен как КФС при наличии связей между своим представлением в виртуальном мире (цифровым описанием) и действиями, происходящими в физическом мире в реальном времени. Знания о текущем состоянии всех элементов производственного процесса позволят самым эффективным образом реализовывать планирование производства [30]. Важнейшим этапом перехода производственного предприятия к концепции

«Умного производства» является его цифровая трансформация, то есть переход к концепции «Цифрового производства».

Знания являются главной ценностью при рассмотрении возможности перехода к концепции «Цифрового производства» в любой производственной сфере. Как уже было сказано выше, для того чтобы описать реализацию процесса изготовления полимерного изделия литьем под давлением необходимо использовать данные множества описаний:

- полимерного изделия в виде 3D-модели и его материала;
- 3D-моделей всех деталей литьевой формы и их материалов, 3D-модели сборки литьевой формы;
- технологий изготовления деталей и сборки литьевой формы;
- характеристик литьевого оборудования (ТПА);
- параметров процесса литья;
- полученных характеристик полимерного изделия (качества получаемой продукции при выполнении всех условий).

Таким образом, *технологическое знание* – это совокупность множества взаимосвязанных данных об объектах, ресурсах и процессах, при использовании и выполнении которых гарантировано получение определенного результата. Традиционно в индустрии переработки пластмасс знания в виде совокупности «конструкция литьевой формы – параметры процесса литья – полимерное изделие» хранятся на предприятиях в виде описания отдельных конкретных производственных задач и опыта работников, поэтому множество разнообразной информации, имеющейся на отдельных предприятиях, не имеет общей базы данных и не может быть преобразовано в знания.

Основной целью концепции «Цифровое литьевое производство» является непрерывный сбор комплексных данных об объектах производства, осуществляемых процессах и используемых для их реализации ресурсах, анализ полученной информации и формирование баз знаний с применением компьютерных технологий. Накопленные таким образом знания могут использоваться в будущем при выполнении новых производственных задач, но для обработки такого количества данных и знаний, сформированных из этих данных, требуется применение множества технологий, в том числе искусственного интеллекта (рисунок 6).

Концепция создания КФС в литьевом производстве заключается в том, чтобы собирать массивы данных (Big Data) об объектах и процессах из физического пространства, сохранять их, формировать модели, комплексно их анализировать и оценивать, прогнозировать и оптимизировать, непрерывно связывать эти данные с конструкциями объектов, их функциями и

характеристиками и формировать, таким образом, полномасштабное цифровое описание физического пространства.

Представление реальных производственных процессов с помощью виртуальных моделей, применяемых в процессе литья под давлением, – это, например, анализ заполнения формующей полости расплавом в CAE Moldex3D, когда реальное физическое пространство переносится в виртуальную среду с помощью комплекса знаний.

Разработчики программного обеспечения, предназначенного для имитационного моделирования, стремятся повышать степень соответствия виртуального и реального миров, в основном, через два аспекта: адекватность построения моделей и технологии анализа данных. Совершенствование математических моделей описания материалов – одна из основных задач разработчиков систем имитационного моделирования процесса литья под давлением.



Рисунок 6 – Технологии цифрового литьевого производства

Важным достижением последних лет является создание модели движения литьевой машины. В классическом процессе моделирования движение шнека ТПА переводилось в скорость и давление, действующее на расплав полимерного материала, что упрощало анализ поведения потока расплава. В качестве примера на фактической стадии впрыска литьевая машина сравнивает собственную измеренную скорость и скорость впрыска, введенную наладчиком, чтобы определить ход шнека. Скорость движения шнека будет увеличена или уменьшена пропорциональным клапаном, который регулируется контроллером литьевой машины. Скорость реакции этого замкнутого контура ТПА является ключевым фактором, влияющим на стабильность процесса, а поддержка стабильности производственных процессов является одной из целей концепции Индустрия 4.0 [31].

Производители литьевого оборудования (ТПА), в целях повышения конкурентоспособности своей продукции, также применяют новые информационные и производственные технологии, характеризующие парадигму Индустрия 4.0. Например, компания Engel (Австрия), называющая свою новую концепцию «Inject 4.0», акцентирует внимание на трех аспектах: «Интеллектуальное оборудование», «Интеллектуальный процесс» и «Интеллектуальное обслуживание». Литьевое оборудование оснащается различными датчиками, позволяющими получать информацию о состоянии узлов и агрегатов оборудования в реальном времени. Специальное программное обеспечение осуществляет непрерывный мониторинг параметров, связанных с производительностью и качеством продукции, и производит их корректировку в случае отклонения от заданных значений. Способность оборудования к сетевому взаимодействию позволяет подключать его к имеющейся MES-системе (Manufacturing Execution System) и по оценке загрузки каждой единицы оборудования перераспределять заказы между всем парком литьевых машин предприятия.

Возможность удаленного технического обслуживания, предоставляемая компанией-производителем, позволяет значительно сокращать возможные простои оборудования, производить идентификацию необходимых запасных частей, заказ которых можно производить через приложение смартфона. Все текущие разработки направлены на усиление вертикальной и горизонтальной коммуникации литьевых машин с периферийными устройствами и датчиками за счет использования единых протоколов обмена данными, что значительно повышает надежность систем [32].

Периферийное оборудование для ТПА представляет собой дополнительное (вспомогательное) оборудование, позволяющее сделать процесс литья под давлением более эффективным и управляемым. К периферийному оборудованию относятся:

- чиллеры (холодильные агрегаты), предназначены для поддержания необходимой температуры рабочих зон литейной машины в процессе работы;
- сушильные шкафы и бункер-сушилки, позволяют подготовить к процессу литья сырье, удалив из него лишнюю влагу, что ощутимо сокращает процент брака при литье полимерных деталей;
- смесители и дозаторы, предназначены для точного смешивания сырья и различных добавок (пластификаторов, наполнителей, стабилизаторов, красителей, пигментов, структурообразователей или других полимеров);
- термостаты (регуляторы температуры), предназначены для поддержания заданной температуры литейной формы, стабильность которой повышает качество полимерных деталей при литье;
- автоматические загрузчики материала, позволяют поддерживать необходимое количество сырья в бункер-сушилках;
- оборудование для дробления и переработки отходов, позволяют перерабатывать отходы литейного производства, такие как литники или отбракованные детали.

Приложения концепции Индустрия 4.0, связанные с работой литейного оборудования, развиваются в настоящее время в следующих направлениях:

- передача оборудованием истинных данных о текущем процессе в систему управления производством;
- обмен данными между литейной машиной и периферийными устройствами;
- интеллектуальная настройка процесса литья под давлением.

Интеллектуальная настройка процесса литья – самая сложная задача, которая показывает вектор развития будущего литейного производства. Причина в том, что развитие этой отрасли все еще во многом зависит от опыта людей. Ни интеллектуальные машины, ни анализ заполнения литейной формы не могут заменить их опыт.

Например, для автоматической коррекции параметров процесса литья с целью повышения его стабильности, контроллер ТПА должен владеть информацией о перерабатываемом полимерном материале, то есть о его характеристиках, описываемых в виде PVT-диаграммы.

PVT-диаграмма – это графическое представление зависимости удельного объема (V) полимерного материала от температуры (T) и давления (P). На основе PVT-диаграммы производят оценку объемной усадки полимерного материала при литье под давлением и выбирают оптимальные условия уплотнения (выдержки под давлением). Пример PVT-диаграммы полистирола Styrolux 656C представлен на рисунке 7.

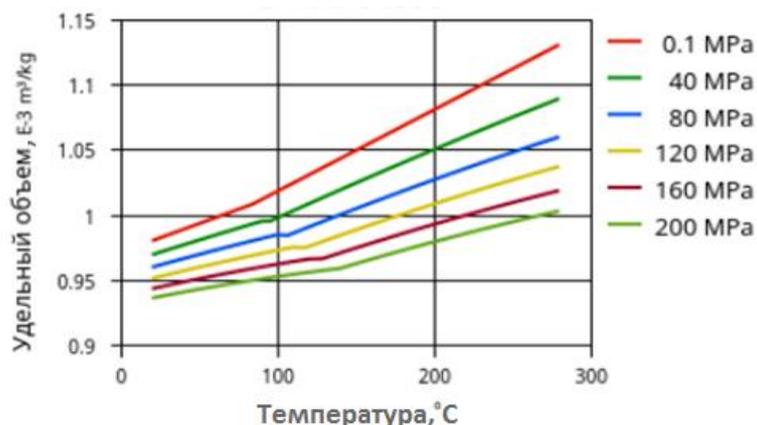


Рисунок 7 – PVT-диаграмма (Styrolux 656C)

Коррекция параметров процесса литья под давлением непосредственно при его выполнении может быть реализована только при непрерывном самоанализе литьевого оборудования и сравнении текущих параметров с эталонными, необходимыми для получения качественного полимерного изделия из определенного полимерного материала.

Полимерное изделие продолжает изменять свои физические характеристики в течение длительного времени и после его изготовления, поэтому контроль полимерных изделий, с целью получения истинных параметров (усадка, коробление и пр.), может быть реализован только через определенный промежуток времени. Таким образом, возникает проблема быстрого сопоставления считываемых с литьевой машины данных о параметрах процесса и характеристик готового полимерного изделия для внесения в процесс необходимых корректировок.

Для перехода к концепции «Цифровое литьевое производство» необходимо интегрировать массивы данных, получаемых с литьевого и периферийного оборудования, передаваемых разработчиками материалов, данных, рассчитанных CAE-системами, данных CAD-систем, данных контроля полимерных изделий и др., комплексно их обрабатывать и формировать соответствующие правила, на основе которых можно было бы создать математические модели, описывающие, например, взаимосвязь жизненных циклов полимерного изделия и литьевой формы, параметров процесса литья и ресурса оборудования, что требует проведения множества экспериментальных исследований.

Установление и описание в цифровом виде всевозможных зависимостей, позволяющее их повторно использовать, является актуальной задачей для любого производственного процесса, в том числе для такого многофакторного, каковым является литьевое производство.

Вопросы для самоконтроля

1. Опишите технологический процесс литья под давлением: используемое оборудование, сырье, основные этапы процесса.
2. Перечислите типы периферийного оборудования, использование которого позволяет повысить эффективность процесса литья под давлением.
3. Перечислите основные задачи технологической подготовки литейного производства.
4. Что представляет собой переналаживаемая литейная форма?
5. Перечислите производственные технологии и виды технологических процессов, формируемых в процессе технологической подготовки литейного производства.
6. Какие преимущества дает использование интегрированных CAD/CAM, CAE и PDM-систем при технологической подготовке литейного производства?
7. Назовите основную цель концепции «Цифровое литейное производство» и используемые цифровые технологии.

2. Интегрированная информационно-технологическая среда литьевого производства

2.1 Организация технологической подготовки литьевого производства в интегрированной информационно-технологической среде

Неотъемлемым условием развития любого приборостроительного предприятия является непрерывное совершенствование организации производственных процессов и их информационного обеспечения за счет использования передовых информационных и промышленных технологий. Предприятия, ориентированные на производство изделий из пластмасс с использованием технологии литья под давлением, для поддержания своей конкурентоспособности должны непрерывно изыскивать пути повышения качества выпускаемой продукции. Многообразие меняющихся и обновляющихся факторов в этой области производственной деятельности требует постоянного мониторинга развития отрасли как с точки зрения усовершенствования программного обеспечения, так и повышения возможностей литьевого оборудования.

Для решения задач подготовки литьевого производства, планирования и управления, материально-технического обеспечения и организации информационных связей между всеми участниками процесса на предприятии должна быть создана *интегрированная информационно-технологическая среда литьевого производства* (ИТС ЛП), которая будет обеспечивать согласованную работу подразделений в едином информационном пространстве с использованием удаленных баз данных и баз знаний.

Разработка комплекса онтологий данной предметной области, используемого системой управления знаниями, позволит организовать взаимодействие программных компонентов. Семантическую же совместимость данных, передающихся от одной системы к другой, должен обеспечивать комплекс агентов-преобразователей.

Реализация ИТС ЛП предполагает использование инструментов планирования, *многоуровневого компьютерного моделирования* и мониторинга производственных процессов с целью сбора, накопления и комплексной обработки взаимосвязанной конструкторской, технологической, организационной и экономической информации для преобразования комплекса полученных данных в знания.

При создании имитационной модели предприятия производственную систему, в зависимости от решаемых задач, можно рассматривать на трех уровнях: модель уровня технологической операции, модель уровня технологического процесса, модель уровня производственного процесса.

Модель технологической операции представляет собой описание процесса изменения формы или свойств материала заготовки, то есть модель процессов механической обработки (точение, фрезерование и пр.), обработки давлением (ковка, штамповка), модель процесса термической обработки, литьевых процессов (литье металлических или полимерных материалов), а также процессов сборки. С использованием модели технологической операции могут решаться задачи отработки конструкции изделия на технологичность, определения оптимальных режимов операций, проектирования и производства специального технологического оснащения и оценки стоимости процессов.

Имитационное моделирование технологических операций, в частности литья под давлением, является эффективным инструментом проверки «правильности» конструирования полимерных изделий и литьевых форм, позволяющим значительно сократить брак при литье. В результате испытания изготовленной литьевой формы, вероятность получения полимерного изделия, не соответствующего требованиям конструкторской документации, при таком подходе будет уменьшаться.

Модель технологического процесса может быть представлена как упорядоченная совокупность моделей технологических операций. Также к этому уровню моделирования относится моделирование работы автоматизированных линий или участков, на которых полностью реализуется технологический процесс в рамках одной производственной ячейки, состоящей из различных технологических модулей (обрабатывающих, сборочных, транспортных и пр.). С помощью модели технологического процесса решаются задачи: программирование отдельных устройств автоматизации для выполнения заданных операций в рамках основного или вспомогательного процесса; определение длительности операций для устройств автоматизации с учетом управляющих программ; синхронизация совместно работающих устройств на уровне виртуальных контроллеров и логических последовательностей сигналов и переменных, запускающих или останавливающих выполнение программ; расчет времени рабочих циклов для автоматизированных ячеек и отдельного оборудования, задействованного в технологическом процессе, и его оптимизация; расчет производительности элементов технологической системы.

Таким образом, разработка моделей уровня технологического процесса позволяет не только получить управляющие программы для устройств и отработать в виртуальной среде алгоритмы их взаимодействия, но и получить данные для экономического анализа того или иного организационного решения, а в отдельных случаях, данные для отделов планирования производства, внутрипроизводственной логистики и планирования продаж.

Модель производственного процесса, помимо основных технологических процессов, непосредственно связанных с получением конечной продукции, включает вспомогательные процессы преобразования различных видов

материальных и информационных ресурсов: управление поставками, управление складами и человеческими ресурсами. Эта модель учитывает межцеховое взаимодействие и логистику, объединяет множество реализуемых на предприятии технологических процессов в единую цифровую модель. Подобные модели достигают масштабов всего предприятия и при этом содержат в своей структуре модели предыдущего уровня – отдельных участков или автоматизированных линий – с целью расчетов их производительности с учетом производительности и загрузки связанных производственных участков [33].

Кроме решения задач, связанных непосредственно с проектированием и изготовлением полимерных изделий литьём под давлением, в ИТС ЛП должна быть организована развитая система приема заказов, позволяющая оперативно определять стоимость и сроки выполнения заказа (изготовления требуемой серии полимерной продукции) на основе разработанных правил, содержащих описание совокупности условий (требуемых ресурсов) для выполнения того или иного производственного заказа.

Создание и функционирование ИТС ЛП, структура которой представлена на рисунке 8, должно основываться на совокупности основных принципов построения сложных систем [34] и принципов, установленных в результате анализа специфики литьевого производства и требований концепции «Цифрового литьевого производства».

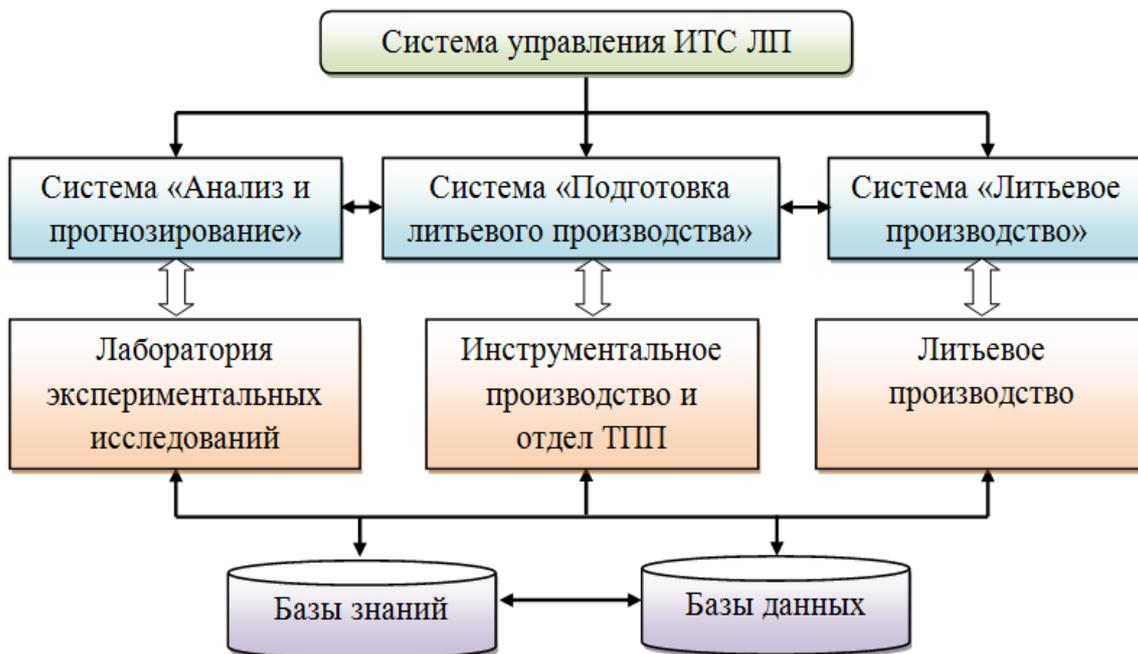


Рисунок 8 – Структура ИТС ЛП

Рассмотрим основные принципы создания и функционирования ИТС ЛП.

1. *Унификация и стандартизация конструкторско-технологических решений.* Для анализа текущей производственной ситуации и выработки стратегий модернизации литейного производства необходимо проводить группирование и классификацию полимерных изделий по сложности и программе выпуска, а также по необходимому для изготовления литейному оборудованию.

2. *Ориентация на использование новых материалов и передовых информационных и производственных технологий.* В целях непрерывного повышения эффективности производственных процессов необходимо проводить исследовательские работы по применению новых материалов и технологий.

3. *Организация единого информационного пространства для всех участников процесса.* Системы должны функционировать на основе единых актуальных компьютерных моделей объектов производства, ресурсов и процессов.

4. *Функциональная совместимость.* Все объекты производственной системы должны быть интегрированы и непрерывно обмениваться информацией, контролируя свое текущее состояние.

5. *Сбалансированность возможностей всех систем ИТС ЛП.* Возможности инструментального производства должны соответствовать сложности разработанных конструкций литейных форм, а литейное оборудование должно иметь возможность реализовывать необходимые технологии литья.

6. *Открытость.* В ИТС ЛП необходимо организовать информационное взаимодействие с разработчиками и производителями материалов, технологического оборудования, программного обеспечения, а также с партнерами-поставщиками ресурсов и заказчиками полимерной продукции.

7. *Прогнозирование и опережающее развитие.* Технологические службы, отвечающие за развитие (модернизацию) литейного производства, должны быть в курсе требований, заложенных в разработках перспективных изделий (по материалам, по технологиям, по размерной точности деталей, расчётной программе производства и себестоимости).

8. *Накопление новых знаний, их постоянный анализ и повторное использование.* Проведение анализа большого количества данных позволит формировать знания, а повторное их использование является основной методологией, которая должна применяться для сокращения трудозатрат при разработке новых изделий в любых отраслях промышленности.

9. *Тестирование предварительных производственных решений на основе виртуальных моделей объектов, процессов и ресурсов производственной системы.* Применение систем имитационного моделирования различных уровней позволит развивать производственную систему в направлении использования технологии «цифровых двойников».

10. *Имитационное моделирование процессов при их совершенствовании.* Планирование введения инноваций в действующие процессы подготовки производства должно сопровождаться оценкой их эффективности с использованием систем моделирования бизнес-процессов.

11. *Управление и планирование на основе постоянного мониторинга процессов.* С целью повышения гибкости производственной системы организационные решения по реализации процессов как в подразделениях инструментального, так и литейного производства должны приниматься с учетом информации о текущей загрузке оборудования.

В производственном цикле, включающем в себя конструкторско-технологическую подготовку, инструментальное и литейное производство, необходимо использовать перспективные информационные и производственные технологии, следовательно, в ИТС ЛП должна быть организована система, предназначенная для анализа текущего состояния процессов и прогнозирования их развития с целью усовершенствования.

С учетом совокупности решаемых задач, информационная среда ИТС ЛП должна состоять из системы управления и трех взаимосвязанных систем: «Анализ и прогнозирование», «Подготовка литейного производства» и «Литейное производство». Эта информационная среда должна объединять соответствующие производственные подразделения, в процессе функционирования которых формируется множество разнообразных данных. Эти данные необходимо накапливать и комплексно обрабатывать с целью повышения эффективности совместной деятельности подразделений предприятия.

Назначение подсистемы «Анализ и прогнозирование» - поддержание производственной системы в состоянии, соответствующем предъявляемым рынком требованиям с учетом современных достижений в области переработки пластмасс. На основе статистического анализа поступающих заказов, исследования новых видов литья, полимерных материалов и технологий изготовления литейных форм здесь должны намечаться пути совершенствования литейного производства, вырабатываться стратегии повышения его эффективности, рассчитываться целесообразность приобретения нового литейного и периферийного оборудования.

Информационное взаимодействие всех систем ИТС ЛП должно осуществляться в ЕИП на основе обращения к сформированным базам данных и базам знаний, содержащим необходимые классы информационных объектов и актуальные на данный момент правила принятия технологических решений. Для информационной поддержки процессов подготовки литейного производства должно быть разработано и поддерживаться в актуальном состоянии множество баз данных: литейного и периферийного оборудования литейного производства, оборудования инструментального производства (механообрабатывающего, электроэрозионного, аддитивного и пр.), материалов (как для производства

изделий из полимерных материалов, так и для изготовления деталей литьевых форм), металлорежущего инструмента, изготовленных ранее литьевых форм и др.

Система «Подготовка литьевого производства» предназначена для реализации процессов ТПП, а также передачи в систему «Анализ и прогнозирование» информации о проектируемых конструкциях литьевых форм и процессах их изготовления в подразделениях инструментального производства, об имеющемся парке оборудования инструментального производства и его состоянии. При этом проектирование конструкций и разработка технологических процессов должны реализовываться с учетом новых знаний, формируемых системой «Анализ и прогнозирование» на основе статистических данных и по результатам проводимых исследований.

Система «Литьевое производство» предназначена для изготовления полимерных изделий литьём под давлением, мониторинга состояния литьевого и периферийного оборудования, параметров реализуемых процессов литья, а также передачи данных в систему «Анализ и прогнозирование». Система «Анализ и прогнозирование» производит оценку соответствия полученных результатов планируемому, при необходимости корректировку правил и планирование загрузки производственной системы.

Основными задачами подсистемы ИТС ЛП «Анализ и прогнозирование» являются:

- систематическая работа по унификации и группированию полимерных изделий с целью формирования технических заданий на конструирование и изготовление ПЛФ;
- совершенствование бизнес-процессов технологической подготовки производства;
- изучение новых материалов и производственных технологий;
- совершенствование унифицированных процессов изготовления ФОД;
- анализ результатов имитационного моделирования технологических и производственных процессов;
- анализ данных мониторинга состояния инструментального и литьевого производства (всей производственной системы) и др.

Анализ номенклатуры поступающих заказов по таким основным параметрам, как габаритные размеры изделий, требования к точности размеров, технология литья, а также накопление статистических данных позволяют обоснованно формировать техническое задание на изготовление ПЛФ, для имеющегося литьевого оборудования. Заказы на производство полимерных изделий литьём под давлением должны быть представлены в виде позволяющих отказаться от чертежно-графической документации аннотированных 3D-моделей, описания предъявляемых к ним эксплуатационных требований, а также марки

полимерного материала и требуемого размера партии изделий. На основе этой информации формируется перечень необходимых для реализации процесса производства ресурсов:

- требуемое литьевое и периферийное оборудование;
- технологическое оснащение (концепт конструкции литьевой формы);
- оборудование для изготовления технологического оснащения;
- полимерный материал;
- оборудование для контроля полимерных изделий.

Актуальная информация о доступности входящих в данный перечень ресурсов на предприятии позволит оценить возможность своевременного выполнения заказа своими силами или, в случае организации предприятия как расширенного, силами его участников. При принятии решения о принципиальной возможности изготовления серии изделий, формируется техническое задание на проектирование литьевой формы.

Оценка экономической эффективности внедрения новых технологий и организационных решений в бизнес-процессы проводится с использованием систем имитационного моделирования и, при рассчитанной системой целесообразности нововведений (сокращение времени и/или стоимости производственного цикла), планируются мероприятия по их реализации.

Имитационное моделирование производственных процессов (например, с использованием системы DELMIA (3D EXPERIENCE) [29]) – необходимый инструмент для виртуальной настройки взаимодействия элементов производственных систем (технологического оборудования, роботов и людей) на основе данных о времени цикла. Может использоваться для оценки наиболее эффективного способа размещения производственного оборудования, которое планируется приобрести с целью модернизации.

Таким образом, для эффективной работы системы «Анализ и прогнозирование» она должна быть организована на базе подразделения, имеющего исследовательскую лабораторию. Для изучения зависимостей и выявления закономерностей использования, а также фиксации знаний о способах применения новых материалов и новых производственных технологий такая лаборатория должна быть оснащена или иметь доступ к современному производственному оборудованию: литьевой машине (ТПА), аддитивному оборудованию, климатической камере, современному контрольно-измерительному оборудованию (КИМ и оптическому сканеру) и пр. Имеющийся в подразделении комплекс программного обеспечения также должен способствовать возможности решения экспериментально-исследовательских задач, выполняемых множеством специалистов, непрерывно повышающих свою квалификацию.

Научно-технологическая лаборатория систем и технологий цифрового производства факультета СУиР Университета ИТМО позволяет проводить подобные экспериментальные исследования. Лаборатория оснащена современным технологическим оборудованием и программным обеспечением, позволяющим решать задачи технологической подготовки литьевого производства. Перечень задач и используемого для их выполнения обеспечения приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Задачи и обеспечение процесса ТПП

№	Задача	Программное обеспечение/ оборудование
1	Проектирование 3D-моделей изделия, отливки и ФОД, проектирование ПЛФ, разработка управляющих программ для оборудования с ЧПУ	CAD/CAM-система Cimatron (Израиль)
2	Анализ процесса литья	CAE-система Moldex3D R16 (Тайвань)
3	Изготовление ФОД	Фрезерный ОЦ HAAS SMM (США) Токарный ОЦ HAAS SL-10 (США)
4	Контроль ФОД и полимерных изделий	КИМ DEA Global Performance 05.07.05 (Hexagon Metrology S.p.A, Италия) Профилометр Hommel Tester T8000 (Hommelwerke GmbH, Германия)
5	Подготовка ТПМ (сушка)	Сушильная камера (мини-сушилка) (Moretto, Италия)
6	Литье под давлением	Термопластавтомат ELEKTRA evolution 30 (Ferromatik Milacron, Германия)
7	Контроль температуры литьевой формы	Термостат TT-188 (TOOL-TEMP AG, Швейцария)

Информационное взаимодействие специалистов ТПП с производителями оборудования и разработчиками материалов позволяет получать новые знания и формировать требования к улучшению характеристик оборудования или свойств материалов.

Система «Подготовка литьевого производства» предназначена для решения следующих задач:

- анализ технологичности полимерных изделий;
- проектирование комплектов ФОД для ПЛФ;

- формирование рабочих технологических процессов изготовления ФОД на основе типовых технологических процессов;
- формирование рабочих технологических процессов изготовления и сборки литьевых форм на основе результатов имитационного моделирования;
- разработка карт контроля, а также программ измерений для контроля ФОД, проводимого с использованием КИМ;
- разработка технологических карт литья;
- разработка технологических процессов контроля и испытаний полимерных изделий;
- хранение информации по реализованным проектам.

Большой объем получаемой из различных источников информации, формируемый в процессе проведения исследовательских работ (рисунок 9), требует применения современных технологий обработки больших объемов данных [35], о необходимости использования которых пишут ведущие организации индустрии переработки пластмасс за рубежом [31, 32].

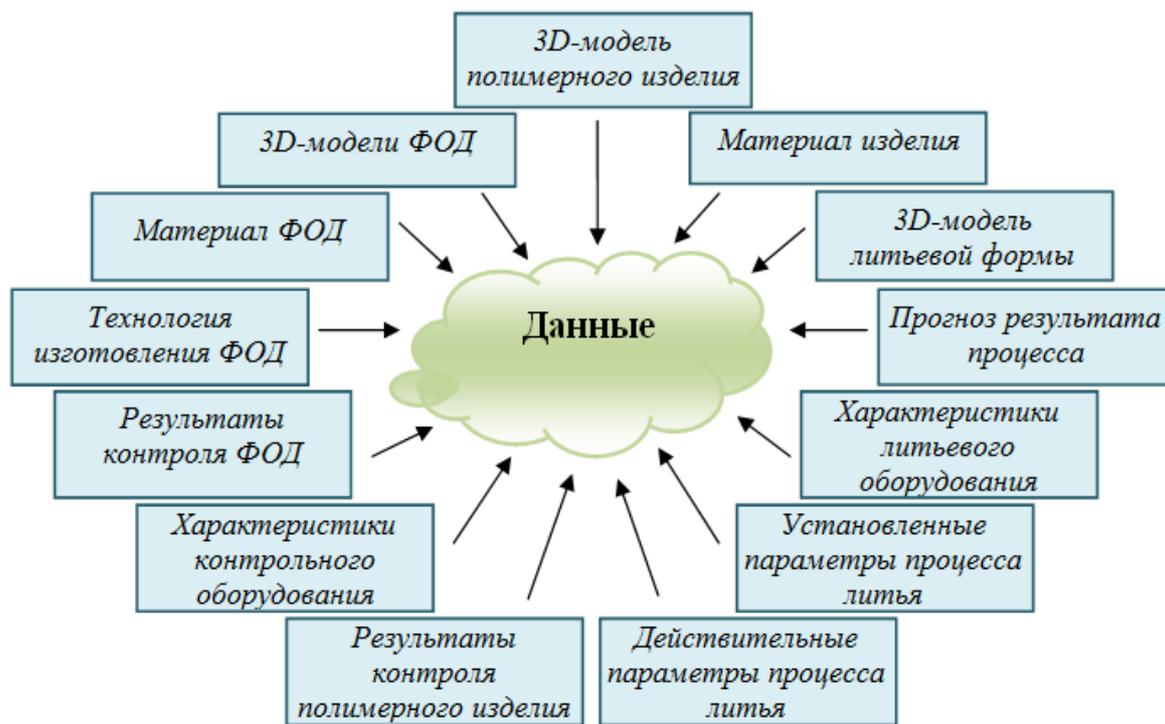


Рисунок 9 – Совокупность данных для комплексного анализа

Построенные в результате исследовательских работ модели данных и оформленные в результате их комплексной обработки знания масштабируются на всю ИТС ЛП и, таким образом, повышают эффективность решения текущих задач подразделений. Эти знания являются динамическими, то есть дополняются

и трансформируются с учетом появления новых знаний и выявленных закономерностей.

Система «Подготовка литейного производства» непрерывно взаимодействует с подразделениями инструментального производства и инструментального обеспечения. Учет данных мониторинга оборудования инструментального производства при разработке технологий изготовления ФОД позволяет оперативно выбрать тот вариант, который на данный момент времени соответствует реальной производственной обстановке, что повышает гибкость технологической подготовки производства. Информационное взаимодействие системы «Подготовка литейного производства» с подразделением инструментального обеспечения позволяет своевременно производить обеспечение инструментального производства, что сокращает время возможных простоев оборудования.

Система «Литейное производство» производит непрерывный мониторинг текущих производственных процессов [36] и загрузки литейного оборудования, владеет информацией о доступном и необходимом количестве материалов, имеющихся в наличии литейных формах и их ресурсе, а также прочей информацией, всесторонне описывающей деятельность существующего литейного производства.

Структура ИТС ЛП отражает тесную взаимосвязь между ее системами и решаемыми в них задачами. Центральной является система «Подготовка литейного производства», которая, используя информацию о геометрии полимерного изделия и режимах его изготовления, на основе знаний, полученных системой «Анализ и прогнозирование», формирует техническое задание на проектирование комплекта ФОД, проектирует его и изготавливает. Принятые на основе знаний решения, определяющие параметры процесса литья изделий, передаются в систему «Литейное производство».

Применение совокупности принципов создания единой информационно-технологической среды позволяет повысить эффективность технологической подготовки литейного производства на основе деятельности производственных подразделений, совместно использующих на различных этапах технологической подготовки производства комплекс взаимосвязанных компьютерных моделей и имеющихся знаний в едином информационном пространстве.

Организация технологической подготовки литейного производства в интегрированной среде способствует принятию эффективных решений в конкретных производственных условиях. ИТС ЛП обеспечивает сокращение продолжительности и стоимости ТПП на основе создания и использования баз данных и баз знаний, формирования групп полимерных изделий, а также формирования и использования базы выполненных ИТС ЛП проектов.

Основными направлениями модернизации литейного производства, как правило, являются:

- максимальное использование возможностей ТПА;
- внедрение новых технологий изготовления литейных форм;
- автоматизация вспомогательных процессов, связанных, например, с подготовкой сырья и транспортировкой готовой продукции.

Модернизация литейного производства должна затрагивать все подразделения, задействованные в производственном цикле: конструкторско-технологическую службу, инструментальное и литейное производство с обязательным соблюдением принципа «уравнивания возможностей»: совершенствование возможностей какого-либо одного из указанных подразделений не даст эффекта без соответствующих изменений в других [4].

Наличие в ИТС ЛП системы «Анализ и прогнозирование» нацелено на совершенствование текущих моделей процессов, а также проведение исследований по уточнению имеющихся и выработке новых знаний с целью их использования в действующих процессах в виде нормативно-справочной информации, что будет способствовать устранению разрыва между результатами научных исследований и их внедрением в производственные процессы.

2.2 Оценка эффективности процессов технологической подготовки литейного производства с использованием методов имитационного моделирования

Стремление предприятий к повышению эффективности производственных процессов с целью минимизации временных и финансовых затрат, обуславливает проведение всестороннего мониторинга непрерывно развивающихся производственных и информационных технологий. Планирование мероприятий по совершенствованию процесса ТПП является одной из основных задач рассматриваемой в предыдущем разделе системы «Анализ и прогнозирование» ИТС ЛП.

Целесообразность внедрения инноваций на предприятии может быть оценена с помощью количественных показателей снижения себестоимости и трудоемкости с учетом затрат на реорганизацию процессов. В этих целях представляется удобным использовать инструменты имитационного моделирования бизнес-процессов – системы класса *BPMS (Business Process Management System)*. Для моделирования бизнес-процессов используется язык *BPMN (Business Process Management Notation)*, который представляет собой описание графических элементов, используемых для построения схемы протекания бизнес-процесса.

Функциональные возможности систем BPMS различны, но, как правило, имеющиеся инструменты делятся на четыре группы в соответствии со стадиями жизненного цикла процесса. На рисунке 10 приведен цикл Деминга, называемый также *циклом PDCA (Plan-Do-Check-Act)* – непрерывный процесс совершенствования продукта или производственного процесса в соответствии с выбранной целью оптимизации. Непрерывное совершенствование продуктов и процессов является неотъемлемой функцией служб предприятия, связанных с управлением качеством.



Рисунок 10 – Цикл Деминга (цикл PDCA)

Описание процесса технологической подготовки литьевого производства в виде *цифровой модели процесса* позволит выявить «узкие места», определить этапы процесса, выполнение которых требует наиболее длительного времени, и целенаправленно планировать мероприятия по сокращению их длительности с сохранением качества результата выполнения рассматриваемого этапа.

Система управления бизнес-процессами Adonis позволяет создавать наглядные цифровые модели, подвергать их анализу и оптимизации. Система Adonis всесторонне описывает модель процесса, включая исполнителей этапов, а также входящие и исходящие информационные потоки. Степень детализации описания этапов процесса и количество указываемых параметров зависят от цели расчета.

Анализ деятельности подразделений приборостроительного предприятия, участвующих в процессе подготовки литьевого производства, позволил выделить ее основные этапы и сформировать модель «традиционного» процесса технологической подготовки литьевого производства, представленную на рисунке 11.

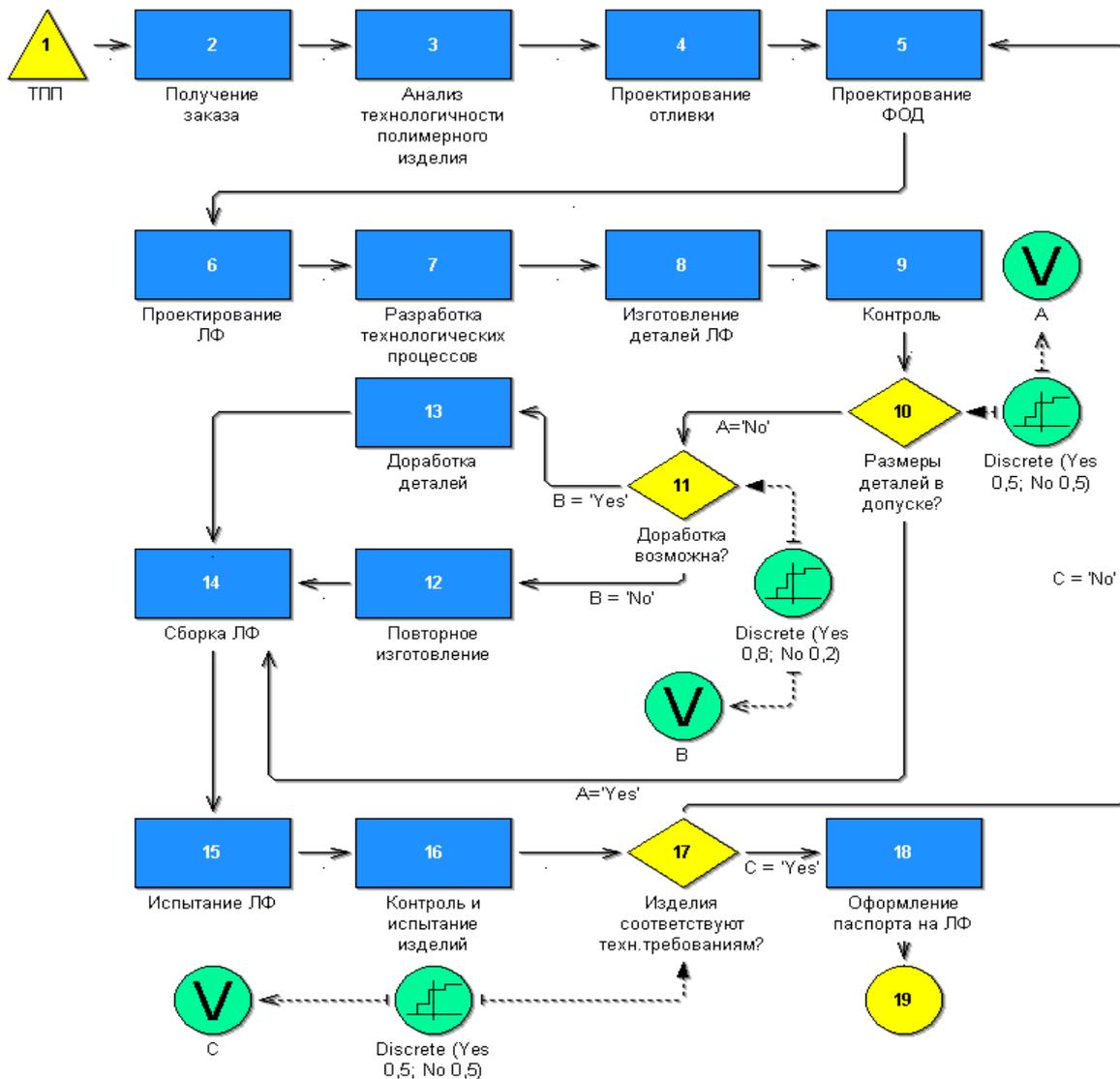


Рисунок 11 – Модель процесса технологической подготовки литейного производства (создана в системе Adonis)

Длительность выполнения этапов процесса, указываемая в системе Adonis в качестве параметров объектов «Деятельность», определяется на основе статистических данных системой «Анализ и прогнозирование» как среднестатистическое время выполнения этапа, которое может быть получено при использовании инструмента Workflow для управления текущими производственными процессами.

При введении новых, еще не реализуемых этапов в модель совершенствуемого процесса, их длительность может быть определена на основе экспертных оценок. Использование среднестатистических значений длительности этапов процесса ТПП позволяет определить среднее время

выполнения процесса независимо от параметров конкретного полимерного изделия, для которого реализуется технологическая подготовка производства.

Система моделирования бизнес-процессов Adonis позволяет указывать длительность этапов процесса с необходимой и достаточной для цели расчета степенью точности в формате «лет : дней : часов : минут : секунд». В рассматриваемом примере выбрано указание продолжительности в днях.

Значения, полученные на основе экспертных оценок, представленные в таблице 2, описывают среднюю продолжительность этапов ТПП для изделий небольшого размера и, соответственно, литьевой формы небольших габаритных размеров. Но таких исходных данных достаточно для описания методики оценки эффективности нововведений.

Таблица 2 – Средняя продолжительность выполнения этапов ТПП

№ этапа	Наименование этапа	Средняя продолжительность, дней
2	Получение заказа	1
3	Анализ технологичности полимерного изделия	1
4	Проектирование отливки	1
5	Проектирование ФОД	2
6	Проектирование ЛФ	2
7	Разработка технологических процессов	3
8	Изготовление деталей ЛФ	14
9	Контроль деталей ЛФ	1
12	Повторное изготовление деталей ЛФ	7
13	Доработка деталей ЛФ	5
14	Сборка ЛФ	2
15	Испытание ЛФ	1
16	Контроль и испытание полимерных изделий	2
18	Оформление паспорта на ЛФ	1

Наличие в модели процесса этапов, связанных с контролем, описываемых вероятностным значением исхода, делает расчет длительности выполнения процесса вероятностным, то есть система рассчитывает минимально возможную длительность выполнения процесса с вероятностью наступления такого события и наиболее вероятную (ожидаемую) длительность выполнения процесса. Вероятность исходов условных переходов при создании модели процесса также определяется на основе статистических данных или же экспертных оценок.

Вероятностный расчет длительности моделируемого процесса в системе Adonis реализуется с помощью инструмента «Path analysis». Для расчета необходимо указать количество иницируемых запусков процесса (в данном расчете было выбрано значение 1000 запусков). Результат расчета минимально возможного времени выполнения процесса, а также вероятность наступления такой последовательности событий представлены на рисунке 12.

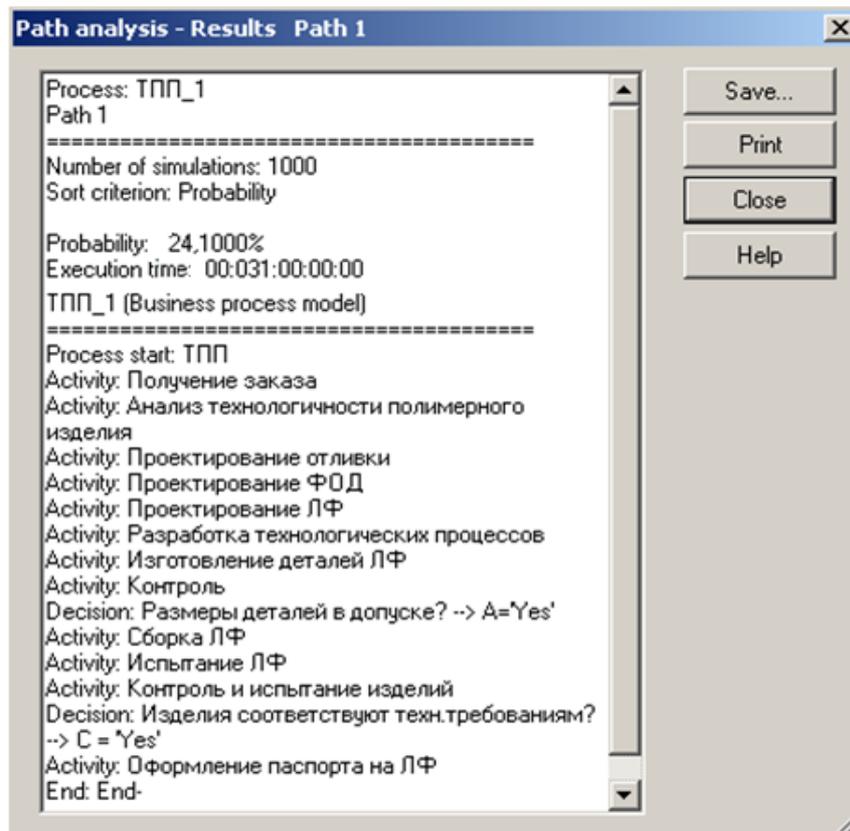


Рисунок 12 – Расчет минимально возможной продолжительности процесса ТПП (рассчитано в системе Adonis)

Как видно из рисунка 12, при указанных длительностях выполнения отдельных этапов процесса и вероятностях событий, определяющих результат условных переходов, минимально возможное время его выполнения составит 31 рабочий день с вероятностью наступления такой последовательности событий 24,1%. При этом также было посчитано наиболее вероятное время выполнения процесса, которое, при указанных исходных данных, составило 63 рабочих дня.

Как уже было отмечено выше, длительность технологической подготовки литьевого производства, при малых сериях выпускаемой продукции, превышает длительность процесса литья полимерных изделий, поэтому требует обязательного рассмотрения возможных путей ее сокращения.

Планируемые мероприятия по оптимизации процесса с целью сокращения его длительности могут быть направлены как на сокращение длительности выполнения его отдельных этапов, так и на повышение вероятности наступления положительных исходов некоторых этапов.

Самым длительным этапом из рассматриваемых является изготовление деталей литейной формы (таблица 2). Сократить его продолжительность позволяет проектирование, изготовление и использование переналаживаемых литейных форм (ПЛФ). Проектированию таких литейных форм предшествует анализ номенклатуры выпускаемой полимерной продукции, формирование групп изделий и их параметрическое описание. Изготовление только сменных формообразующих деталей (ФОД), при условии отнесения нового изделия к группе, значительно сократит время изготовления и сборки литейной формы. С использованием системы имитационного моделирования процесса технологической подготовки литейного производства, может быть оценена эффективность применения группового метода проектирования и изготовления формообразующей оснастки.

Изменение модели процесса технологической подготовки литейного производства реализуется путем удаления или добавления объектов модели, а также изменением значений параметров объектов. Изменение модели процесса, связанное с применением ПЛФ при подготовке литейного производства, реализуется путем удаления этапа процесса «Проектирование ЛФ», изменения этапа «Изготовление деталей ЛФ» на «Изготовление ФОД» и изменением длительности связанных с новшеством этапов 8, 9, 12, 13 и 14. При этом предполагается, что ПЛФ спроектированы заранее и в каждом иницируемом процессе ТПП обязательно используются в качестве базовых конструкций формообразующей оснастки.

Расчет показал, что при изменении модели процесса и длительности этапов, которые могут быть затронуты нововведениями (наличием ПЛФ и возможностью ее использования, определенной на основе алгоритма адресации), минимальное время выполнения процесса составит 18 рабочих дней с вероятностью наступления такой последовательности событий 23%. Наиболее вероятное время выполнения процесса при этом составит 34 рабочих дня.

Вероятность получения готового полимерного изделия, соответствующего требованиям конструкторской документации, с первого раза, согласно экспертной оценке, составляет 50%. Таким образом, в 50% случаев требуется вносить изменения в конструкцию комплекта ФОД и повторно его изготавливать или дорабатывать. В связи с этим, для проверки «правильности» конструкторских решений целесообразным является изготовление опытного комплекта ФОД, предназначенного для литья опытной (пилотной) серии полимерных изделий. Такой комплект, в связи с низкими требованиями к его стойкости (требуется получить малую партию изделий), может быть изготовлен

из термостойких полимерных материалов с использованием аддитивных технологий.

Продолжительность изготовления опытного комплекта ФОД на аддитивной установке (3D-принтере) составляет несколько часов, но, в целях обеспечения единства используемых единиц описания длительности этапов процесса и с учетом необходимости проведения постобработки, принимается равной 1 рабочему дню. Результат расчета модели процесса ТПП с изготовлением опытного комплекта ФОД показал, что минимально возможная длительность выполнения процесса составит 22 рабочих дня с вероятностью 25,9%. Наиболее вероятная длительность выполнения процесса – 29 рабочих дней.

Планирование внедрения инноваций в существующие процессы сопровождается также расчетом затрат, необходимых для их реализации. В случае добавления в процесс подготовки литейного производства этапа изготовления опытного комплекта ФОД с использованием аддитивных технологий, следует рассчитать стоимость внедрения данной инновации. Срок окупаемости приобретенного аддитивного оборудования будет зависеть от частоты инициации процессов ТПП для новых изделий. В случае, когда работы, связанные с ТПП для новых изделий, проводятся нерегулярно, целесообразным может быть использование аутсорсинга либо создание единого центра аддитивных технологий для объединения производственных компаний.

Для повышения вероятности получения полимерного изделия, соответствующего техническим и эксплуатационным требованиям, целесообразно применять системы имитационного моделирования процессов литья, относящиеся к классу CAE. Использование таких систем на этапе проведения анализа технологичности позволяет прогнозировать поведение расплава полимера внутри формообразующей полости литейной формы и предсказать образование дефектов, а значит, внести необходимые корректировки в конструкцию формообразующих деталей или параметры процесса литья еще на стадии проектирования, а также провести корректировку 3D-модели самого изделия. Математические модели полимерных материалов и процессов литья, используемые CAE-системами для расчета, не могут учитывать отклонения реальных параметров от идеальных, что неизбежно в реальном производстве. Поэтому применение таких систем позволит повысить вероятность положительного исхода этапа контроля до 80%. Наиболее вероятная длительность выполнения процесса с использованием CAE-систем, согласно расчетам, составит 24 рабочих дня.

Если рассматривать наиболее вероятные длительности выполнения процессов, то расчеты, проведенные с использованием системы Адонис, показали сокращение длительности ТПП: при использовании ПЛФ – с 63 рабочих дней до 34, при использовании ПЛФ и изготовлении опытного комплекта ФОД – с 63 до 29 рабочих дней, при использовании ПЛФ, опытного комплекта ФОД и

проведении предварительных оптимизационных расчетов в САЕ-системе – с 63 до 24 рабочих дней.

Таким образом, методика оценки эффективности совершенствования процессов ТПП состоит из следующих этапов:

- 1) построение действующей модели процесса ТПП, расчет минимально возможной и наиболее вероятной длительности его выполнения;
- 2) анализ процесса и выявление этапов, длительность или результат которых будут затронуты планируемым нововведением;
- 3) корректировка модели путем добавления новых блоков модели (этапов) или же удаления имеющихся или изменения их атрибутов (длительности);
- 4) проведение повторного расчета и анализ результатов.

Моделирование измененных с целью усовершенствования действующих процессов ТПП в системах имитационного моделирования бизнес-процессов позволяет спрогнозировать вероятностное сокращение его длительности или повышения качества результата еще до реального выполнения оптимизационных мероприятий, что является эффективным инструментом планирования и оценки производственных процессов.

2.3 Применение аддитивных технологий для изготовления формообразующих деталей литьевых форм

Изготовить опытную партию полимерных изделий из штатного ТПМ возможно только с использованием технологии литья под давлением, для чего необходимо проводить полноценную технологическую подготовку литьевого производства. Вышесказанное справедливо и в том случае, когда эта малая партия изделий является не опытной, а требуемой.

Аддитивные технологии позволяют без использования режущего инструмента создавать физические модели деталей на основе цифровых. Такую физическую модель, получаемую за несколько часов (в зависимости от размера), можно использовать в качестве образца изделия для демонстрации или для оценки:

- внешнего вида и эргономичности;
- удобства монтажа / демонтажа детали в изделии при сборке или ремонте;
- необходимой размерной точности;
- работоспособности изделия (способности выдерживать эксплуатационные нагрузки).

Если же необходима серия опытных деталей, то изготовленную с помощью аддитивных технологий деталь можно использовать как мастер-модель для изготовления заливочной силиконовой формы. В такие формы можно заливать под вакуумом специальные материалы-имитаторы таких пластиков как ПП, АБС, ПА, ПММА. Стойкость силиконовых форм составляет 20-50 заливок в зависимости от геометрии изделия и используемого полимерного материала [17]. При этом детали, изготовленные из материалов-имитаторов, которые применяются в аддитивном производстве или при литье в силиконовые формы, могут вести себя иначе в процессе эксплуатации, чем детали из штатных ТПМ, указанных в конструкторской документации. Кроме того, диапазон эксплуатационных характеристик материалов-имитаторов меньше, чем у штатных материалов, что накладывает ограничения на процесс натуральных испытаний всего изделия в целом. Таким образом, для осуществления полномасштабных натуральных испытаний необходимо изготавливать полимерные детали из штатных полимерных материалов литьем под давлением.

Как уже говорилось, технологическая подготовка производства изделий из ТПМ литьем под давлением является длительным, итерационным процессом, связанным с проектированием и изготовлением литьевой формы. Первые отливки, изготовленные литьем под давлением на ТПА, как правило, могут быть получены только через несколько недель (а иногда и месяцев) с начала подготовки производства.

Использование ПЛФ позволяет быстро спроектировать и изготовить сменный комплект ФОД, который может использоваться в качестве опытного, предназначенного для оценки работоспособности конструкции полимерного изделия и тестирования ТПМ, как описано выше, или же в качестве рабочего, предназначенного для изготовления малой серии изделий из термопластичных полимерных материалов литьем под давлением. При этом малая партия изделий может рассматриваться как опытная, предназначенная для оценки правильности конструирования и испытания работоспособности полимерного изделия. Для изготовления малой (опытной) серии изделий литьем под давлением не требуется высокая стойкость формообразующих деталей (ФОД), поэтому целесообразным является использование для их изготовления таких материалов и технологий, при которых длительность изготовления будет меньше, а стойкость будет достаточной. Минимальная партия изделий, как правило, представляет собой партию в 100 ± 50 изделий, ее еще иногда называют «пилотной» серией. Следовательно, это значение можно принять за минимальную требуемую стойкость. Использование алюминиевых сплавов в качестве материала ФОД позволяет сократить время их изготовления за счет возможности назначения более производительных режимов резания по сравнению с обработкой стали [37].

Определяющими факторами, влияющими на возможность использования материала для изготовления ФОД, является его способность выдерживать

нагрузки, возникающие в процессе литья под давлением, в первую очередь, высокие температуры и давление. В настоящее время идет непрерывный процесс разработки новых полимерных композиционных материалов с уникальными свойствами для решения тех или иных инженерных задач. Среди предлагаемых широко известными в индустрии 3D-печати компаниями, такими как EOS (Германия), Stratasys (США) и 3DSYSTEMS (США), представлен класс материалов достаточно высокой теплостойкости и прочности, что позволяет рассматривать такие материалы в качестве возможных для изготовления ФОД.

Проектирование конструкции ФОД, а также проведение анализа течения потока расплава требует обязательного применения систем имитационного моделирования процесса формообразования (CAE-систем) для поиска наилучшего соотношения «конструкция – параметры процесса». Для такого расчета необходимо наличие в системе математической модели, описывающей используемый материал ФОД, следовательно, компаниям-разработчикам новых полимерных материалов следует поддерживать информационное взаимодействие с разработчиками CAE-систем.

Изготовление ФОД, независимо от выбранного для них материала, должно производиться на основе 3D-моделей. В случае традиционного фрезерования, 3D-модель используется для разработки управляющих программ для станков с ЧПУ, а при выборе аддитивных технологий – для генерации слоев 3D-модели с использованием программного обеспечения аддитивной установки.

Несмотря на то, что аддитивные технологии принято рассматривать как не требующие приобретения и использования дорогостоящего режущего инструмента, для получения поверхностей высокого качества, каковыми должны быть формирующие поверхности ФОД, в подавляющем большинстве случаев будет необходима их постобработка.

В научно-технологической лаборатории систем и технологий цифрового производства факультета СУиР Университета ИТМО было проведено экспериментальное исследование по применению полимерных ФОД литьевых форм для изготовления опытных серий полимерных деталей. В качестве материалов для изготовления ФОД были выбраны:

– PA2200 (EOS, Германия). Представляет собой модифицированный полиамид ПА12 в виде порошка, детали из которого изготавливаются с использованием установки EOSINT Formiga P110 по технологии SLS (Selective Laser Sintering) – послойное спекание порошковых материалов лучом лазера.

– Digital ABS Plus (Stratasys, США). Представляет собой имитацию ABS-пластика, получаемую на установке Stratasys Objet путем смешивания материалов RGD515 Plus и RGD531 по технологии PolyJet (послойное отверждение жидкого фотополимерного материала под воздействием ультрафиолетового излучения).

– Accura Bluestone (3DSystems, США). Композитный полимерный материал, детали из которого изготавливают на установке ProX 800 по технологии SLA (Laser Stereolithography) – послойное отверждение жидкого фотополимера лучом лазера.

– Accura HPC (3DSystems, США). Композитный материал повышенной жесткости, технология изготовления деталей из которого аналогична технологии изготовления из материала Accura Bluestone.

Характеристики материалов ФОД, связанные с их возможной стойкостью при нагрузках, возникающих в процессе литья под давлением, приведены в таблице 3. В качестве материала ФОД для изготовления малых серий полимерных изделий возможно использование алюминиевых сплавов, поэтому в качестве базовых значений параметров материала ФОД, достаточных для реализации процесса литья под давлением, в таблице также приведены характеристики алюминиевого сплава Д16Т.

Таблица 3 – Сравнительные характеристики материалов ФОД

Материал	Физические характеристики			
	Теплостойкость, °С	Плотность, г/см ³	Предел прочности, МПа	Модуль упругости при изгибе, МПа
Д16Т	250	2,8	390-420	72000
EOS PA2200	172-180	0,93	58	1500
Digital ABS Plus	92-95 (ТО)	1,18	55-60	1700-2200
Accura Bluestone	66 → 267-284 (ТО)	1,78	66-68	8300-9800
Accura HPC	73 → 250 (ТО)	1,61	66-89	8700-10200

Как можно увидеть из приведенной таблицы, термостойкость некоторых полимерных материалов, используемых для аддитивных технологий, может быть повышена путем термической обработки (ТО) «напечатанных» деталей, что может быть целесообразным для расширения границ применимости таких материалов.

Для заказа изготовления комплектов ФОД использовался Маркетплейс аддитивных технологий. Используемые в данном исследовании ФОД, изготовленные с использованием аддитивных технологий, представлены на рисунках 13 и 14. Поверхности деталей, изготовленных с использованием технологии SLS, имеют повышенную шероховатость (следы порошка), если не производить постобработку. Применение технологии SLA характеризуется искривлением верхних поверхностей детали из-за «эффекта поверхностного

натяжения» верхних слоев жидкого полимера. Детали, изготовленные по технологии PolyJet, имеют на поверхностях следы от струйной печати, размер которых зависит от диаметра используемого сопла и свойств применяемого фотополимерного материала. Однако доводка поверхностей деталей из фотополимерных материалов имеет относительно малую трудоемкость.



Рисунок 13 – Комплект ФОД, изготовленный из материала Digital ABS Plus по технологии PolyJet (Stratasys)



Рисунок 14 – Комплекты ФОД, изготовленные из материалов Accura HPC и Accura Bluestone по технологии SLA (3DSystems)

Тип полимерного материала, способ воздействия на полимерный материал и указанные производителями диапазоны толщин слоев печати для используемых при изготовлении формообразующих деталей аддитивных технологий, приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Основные параметры аддитивных технологий

Аддитивная технология	Тип материала	Воздействие на материал	Толщина слоя печати
SLS	Полимерный порошок	Лазер	0,05 – 0,1 мм (диаметр гранул)
SLA	Жидкий полимер	Лазер	0,025 – 0,1 мм
PolyJet	Жидкий полимер	УФ - излучение	0,014 – 0,1 мм

Было установлено, что с целью повышения качества поверхностей ФОД, которые предназначены для формирования геометрии полимерных деталей, то есть поверхностей, которые будут контактировать с расплавом полимерного материала, а также с целью достижения требуемой размерной точности деталей необходимо проведение постобработки. Полученные в процессе экспериментальных исследований режимы постобработки представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Режимы постобработки полимерных ФОД

Материал	Режущий инструмент	Обороты шпинделя, об/мин	Подача, мм/мин	Глубина резания, мм	Охлаждение
EOS PA2200	Концевая фреза Ø12 мм (твердый сплав)	2000	200	0,05 – 0,2	Blaser Blasocut 4000 CF
Digital ABS Plus		2500	200	0,05 – 0,3	Не требуется
Accura Bluestone		4000	200	0,05 – 0,1	Жидкость без содержания масла (непрерывное охлаждение)
Accura HPC		4000	200	0,05 – 0,1	

После проведения постобработки необходимо контролировать размерную точность, в частности глубину формирующей полости. Процесс контроля ФОД из материала Accura Bluestone после обработки на станке HAAS SMM представлен на рисунке 15.

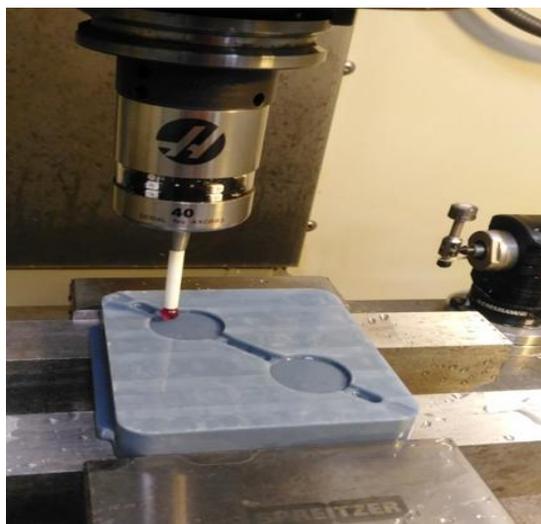


Рисунок 15 – Контроль глубины формующей полости ФОД

На фрезерном обрабатывающем центре HAAS SMM была произведена постобработка рабочих поверхностей. Для оценки влияния экспериментально установленных параметров постобработки на качество поверхностей полимерных ФОД, изготовленных с использованием аддитивных технологий, с использованием профилографа-профилометра Hommel Tester T8000 был произведен контроль шероховатости формообразующих поверхностей. Было проведено измерение параметров шероховатости поверхностей (R_a , R_z и R_{max}) формующей полости ФОД после изготовления на аддитивном оборудовании и после постобработки на фрезерном обрабатывающем центре. Для материала Digital ABS Plus значения всех анализируемых показателей сократились более чем в 10 раз, для материала EOS PA2200 сократились более чем в 5 раз.

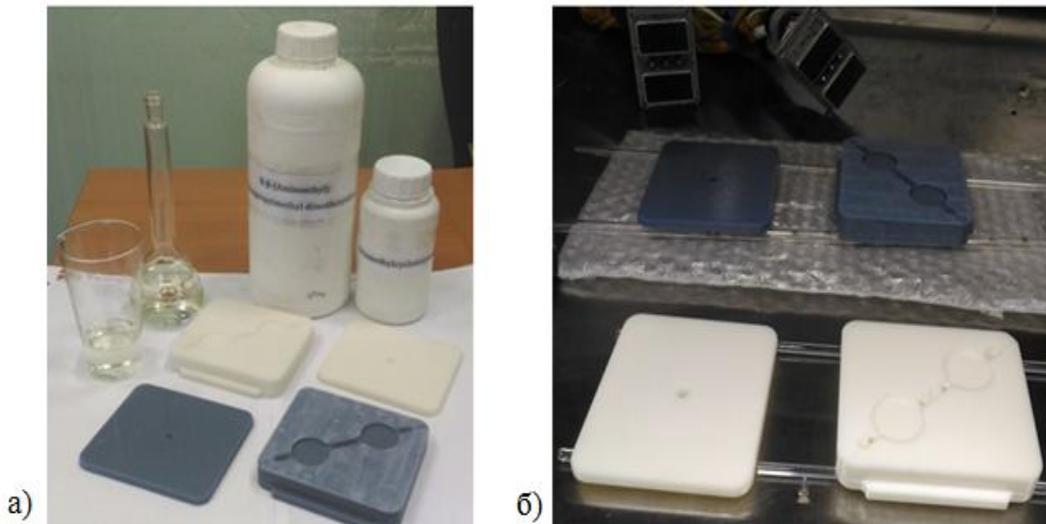
Длительность процесса изготовления полимерных ФОД с использованием аддитивных технологий T_{AT} можно определить по формуле:

$$T_{AT} = T_{подг} + T_{изг} + T_{по} + T_{то}, \text{ мин} \quad (1)$$

- где $T_{подг}$ – длительность подготовки 3D-модели, мин;
 $T_{изг}$ – длительность изготовления детали (3D-печать), мин;
 $T_{по}$ – длительность постобработки, мин;
 $T_{то}$ – длительность термообработки, мин.

Производителями композиционных полимерных материалов Accura Bluestone и Accura HPC (3DSystems) указано, что теплостойкость данных материалов может быть значительно повышена путем проведения термообработки: с 66°C до 284°C и с 73°C до 250°C соответственно. Этапы

процесса термической обработки ФОД из материалов Accura Bluestone и Accura HPS (нанесение специального аминомодифицированного силиконового масла, нагрев и охлаждение в климатической камере) представлены на рисунке 16.



*Рисунок 16 – Термообработка ФОД для материалов 3DSystems:
а) процесс обработки поверхностей специальным составом;
б) детали, размещенные в климатической камере*

Длительность подготовки 3D-модели включает: размещение 3D-модели на платформе, выбор параметров процесса и генерацию слоев. Длительность изготовления зависит от параметров процесса и высоты детали, то есть от количества слоев. Кроме того, разные детали можно изготавливать на одной аддитивной установке одновременно. Длительность постобработки сопоставима с длительностью выполнения чистовой обработки при фрезеровании, режимы резания при этом зависят от используемого полимерного материала. Некоторые полимерные материалы, используемые для изготовления ФОД, требуют проведения термообработки, что будет увеличивать длительность получения комплекта ФОД, готового к установке в ПЛФ, при этом длительность является соизмеримой с длительностью процесса фрезерования.

Представленные в этом разделе данные получены в результате исследовательской деятельности системы ИТС ЛП «Анализ и прогнозирование», о которой говорится в предыдущем разделе. Установлено, что ФОД, изготовленные с использованием аддитивных технологий из полимерных материалов, могут применяться при изготовлении опытных образцов полимерных изделий. Также установлено, что расширение номенклатуры оборудования, которое может быть использовано при изготовлении ФОД для ПЛФ, приводит к совершенствованию процесса технологической подготовки литьевого производства, так как значительно повышает его гибкость.

Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите уровни цифровых моделей, формируемых при создании имитационной модели предприятия, и задачи, решаемые с использованием данных моделей.
2. Сформулируйте цель создания информационно-технологической среды литейного производства (ИТС ЛП) и опишите ее структуру.
3. Перечислите принципы создания и функционирования ИТС ЛП.
4. Перечислите подсистемы ИТС ЛП и их назначение.
5. Перечислите производственные технологии и виды технологических процессов, формируемых в процессе технологической подготовки литейного производства.
6. Назовите основную цель концепции «Цифровое литейное производство» и используемые цифровые технологии.
7. Какие данные необходимы для комплексного анализа процесса литья и формирования технологического знания.
8. Опишите класс систем моделирования, используемых для анализа и совершенствования бизнес-процессов.
9. Какие преимущества может дать применение аддитивных технологий при технологической подготовке литейного производства, какие существуют ограничения их применения?

3. Методики и модели цифровой технологической подготовки литейного производства

3.1 Унифицированный процесс проектирования и изготовления формообразующих деталей литейных форм

Как было отмечено выше, для повышения своей конкурентоспособности промышленным предприятиям необходимо уметь быстро перестраивать производственные процессы на новый тип выпускаемой продукции, то есть создавать гибкие автоматизированные производства (ГАП).

Применение методов и принципов группового производства позволяет повысить регулярность и устойчивость во времени выполнения типовых производственных процессов. *Групповое производство* – это прогрессивная форма организации дискретных (прерывных) производств, технологической составляющей которой является унифицированная (типовая) форма организации процессов. *Унифицированный технологический процесс* – это технологический процесс, относящийся к группе изделий, характеризующихся общностью конструктивных и технологических признаков. Унифицированный технологический процесс позволяет изготовить любую деталь группы без значительных отклонений от общей технологической схемы.

Технологическая унификация подразделяется на уровни в соответствии с детализацией технологического процесса. Наивысшим уровнем является маршрут обработки. Здесь унифицируется последовательность операций, которая справедлива для множества деталей, принадлежащих к одной классификационной совокупности. То есть если от отдельных наименований деталей переходить к формированию групп конструктивно или технологически схожих деталей, то технологический процесс преобразуется в унифицированный и может рассматриваться как объект комплексной автоматизации. Это, естественно, справедливо и для специализированных предприятий, ориентированных, например, на изготовление деталей из пластмасс.

Цифровая технологическая подготовка производства должна быть организована как унифицированный процесс, представляющий собой последовательное принятие решений и формирование совокупности информационных объектов. При этом последовательно создается набор взаимосвязанных и согласованных моделей объектов производства, технологического оснащения и моделей процессов. Такое информационное описание производственной системы позволит предприятию быстро адаптировать его под новые (специализированные) требования к изделию и перейти с одного типа выпускаемой продукции на другой.

В процессе технологической подготовки производства изделий из ТПМ литьем под давлением формируется *иерархическая модель данных* [38], унифицированная (типовая) структура которой представлена на рисунке 17.

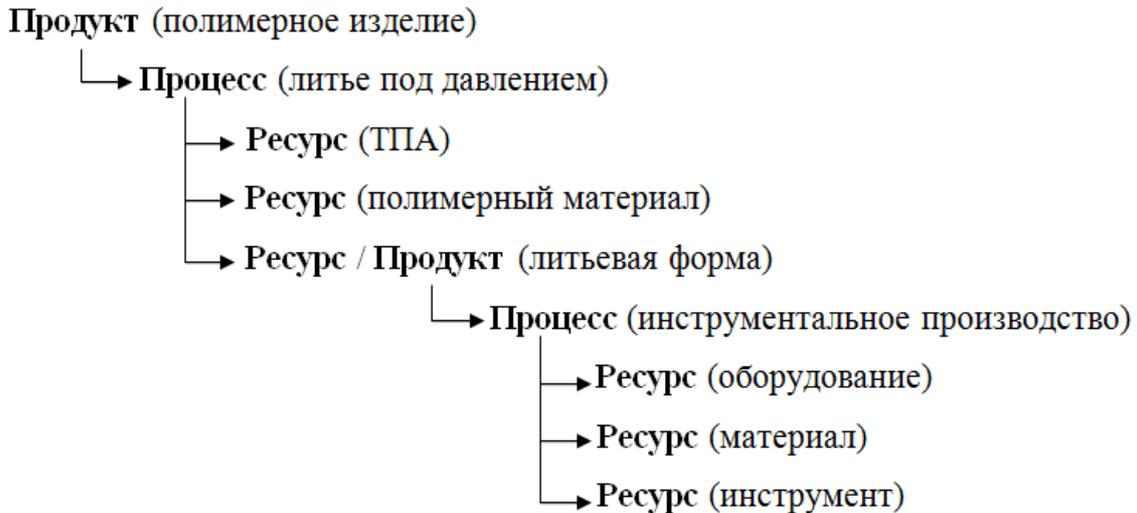


Рисунок 17 – Иерархическая модель данных «Продукт – Процесс – Ресурс»

Многовариантность реализации процессов предполагает обязательное использование инструментов оценки и ранжирования возможных технологических решений по выбранному критерию в зависимости от приоритетного в конкретной производственной ситуации. Автоматизированное формирование совокупности данных с учетом информации, полученной при мониторинге текущего состояния производственной системы, позволит использовать производственные ресурсы наиболее эффективным образом, что особенно актуально при малых размерах партий выпускаемой продукции, характерных для современного приборостроения.

Характеристики информационных объектов модели данных типа «Процесс» представляют собой описание технологических процессов, позволяющих реализовать получение необходимых характеристик объектов производства. Формирование совокупности параметров процессов должно основываться на использовании баз знаний, содержащих правила выбора технологических решений [39, 40]. Базы знаний, в свою очередь, формируются на основе систематизации и обобщения данных, полученных при анализе результатов реализованных ранее процессов.

В условиях мелкосерийного литейного производства, при обязательном использовании ПЛФ, отнесение нового полимерного изделия к группе изделий, изготовление которых возможно с использованием конкретной ПЛФ, может быть реализовано с использованием алгоритма адресации. Использование ПЛФ при

технологической подготовке литьевого производства ограничивает размеры комплекта сменных ФОД, которые ограничивают размеры проектируемой отливки. На этапе анализа технологичности полимерного изделия, с учетом программы производства и условий эксплуатации, разрабатывается 3D-модель отливки. Применение САД-систем при проектировании отливки на основе 3D-модели полимерного изделия позволяет быстро получить варианты 3D-моделей для формирующих полостей различной гнездности, рассчитать значения их объемов и габаритных размеров для оценки возможности размещения в габаритах комплекта ФОД, которые ограничены размером окна в обоймах литьевых форм под установку ФОД в ПЛФ. Если параметры полимерного изделия не соответствуют диапазонам параметров для имеющихся ПЛФ, то параллельно с изготовлением уникальной литьевой формы, формируется новая группа изделий для проектирования новой ПЛФ.

Габаритные размеры комплекта ФОД, указанные в описании ПЛФ, представляют собой суммарные размеры заготовок, используемых для изготовления ФОД для конкретного полимерного изделия. При использовании САД-систем для проектирования ФОД формирующие поверхности создаются автоматически на основе 3D-модели отливки (модели ассоциативно связаны) после выбора положения поверхности разъема путем «вычитания» 3D-модели спроектированной отливки из 3D-моделей заготовок ФОД для выбранной ПЛФ.

После выбора полимерного материала для изготовления ФОД необходимым является применение САЕ-систем для моделирования процесса литья и анализа спроектированной конструкции. Как минимум, необходимо провести анализ «проливаемости» отливки. Значения линейной и объемной усадок, рассчитанные в процессе имитационного моделирования, должны использоваться для корректировки размеров 3D-моделей ФОД при их подготовке к разработке управляющих программ для станков с ЧПУ.

Использование станков с ЧПУ для выполнения постобработки полимерных ФОД обуславливает применение для разработки управляющих программ САМ-систем, позволяющих формировать наборы унифицированных процедур обработки. *Унифицированная процедура в САМ-системе* представляет собой расчет траекторий перемещения инструмента на основе информации о формируемой поверхности 3D-модели (ФП) или группе таких поверхностей, геометрии применяемого инструмента (И) и режимах обработки (РО) с учетом исходной 3D-модели (операционной заготовки). Методика получения 3D-моделей операционных заготовок связана с преобразованием 3D-модели конечной детали (D) в модель заготовки (Z) для каждой операции.

Унифицированная процедура САМ-системы, описывающая процесс преобразования модели заготовки (Z) в модель детали (D) или промежуточной заготовки (Z_1), может быть представлена как:

$$Z \rightarrow D: \Pi_i = \{\Phi\Pi, И, РО\}$$

Таким образом, последовательность процедур Π , позволяющих осуществить преобразование 3D-модели исходной заготовки в 3D-модель детали, представляет собой описание технологического процесса:

$$\text{ТП} = \{\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n\}$$

Шаблон процедуры обработки представляет собой параметризованную процедуру, в которой по определенным критериям выбираются обрабатываемые поверхности, указывается используемый инструмент и режимы резания.

Наличие в 3D-моделях различных конфигураций ФОД поверхностей типового функционального назначения (разводящие и впускные литники, отверстия для толкателей, поверхности разъема и пр.) позволяет использовать в качестве критерия выбора цвет поверхности, сопоставленный с ее функциональным назначением (рисунок 18). Подготовка 3D-моделей к применению шаблонов заключается в выделении определенным цветом поверхностей того или иного функционального назначения в соответствии со сформированной заранее цветовой картой.

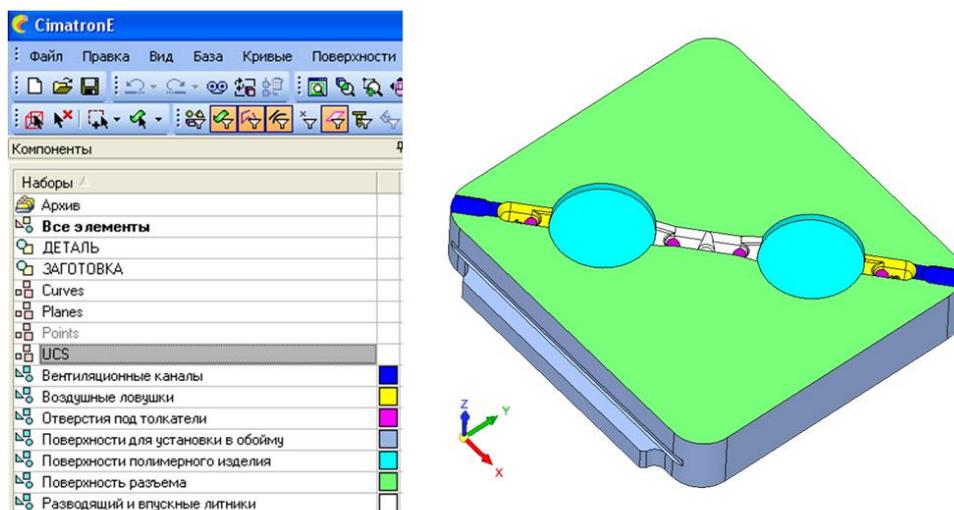


Рисунок 18 – Формирование групп поверхностей 3D-модели по функциональному назначению (построено в системе Cimatron)

Технологический процесс изготовления деталей ФОД фрезерованием может представлять собой последовательность переходов (процедур) для черновой и чистовой обработки поверхностей типового функционального назначения. При одинаковой конфигурации ФОД и различных материалах режимы резания будут отличаться, а, следовательно, можно разработать шаблоны, отличающиеся

параметрами обработки при неизменном выборе обрабатываемых поверхностей по критериям. Использование шаблонов унифицированных процедур, основанных на цветowych картах функциональных поверхностей, позволяет в 2 раза сократить длительность подготовки управляющих программ для обработки деталей.

Контрольные операции являются неотъемлемой частью любого технологического процесса. Современные САМ-системы позволяют разрабатывать процедуры контроля геометрии обработанных поверхностей на станке без съема детали. Такие процедуры тоже должны быть, по возможности, включены в унифицированный технологический процесс изготовления ФОД. Преимуществом такого промежуточного контроля (без съема заготовки со станка) является возможность корректировки управляющей программы на основе полученных значений и отсутствие необходимости повторного выставления ФОД на станке для доработки, что является весьма трудоемкой задачей. Если процедуры станочного контроля не предусмотрены, то контроль производится на координатно-измерительных машинах (КИМ), преимуществом которых является возможность проведения совместно с размерным контролем контроля отклонения формы. Для контроля детали на КИМ требуется 3D-модель. Изображения 3D-моделей формообразующих деталей с аннотациями показаны на рисунке 19.

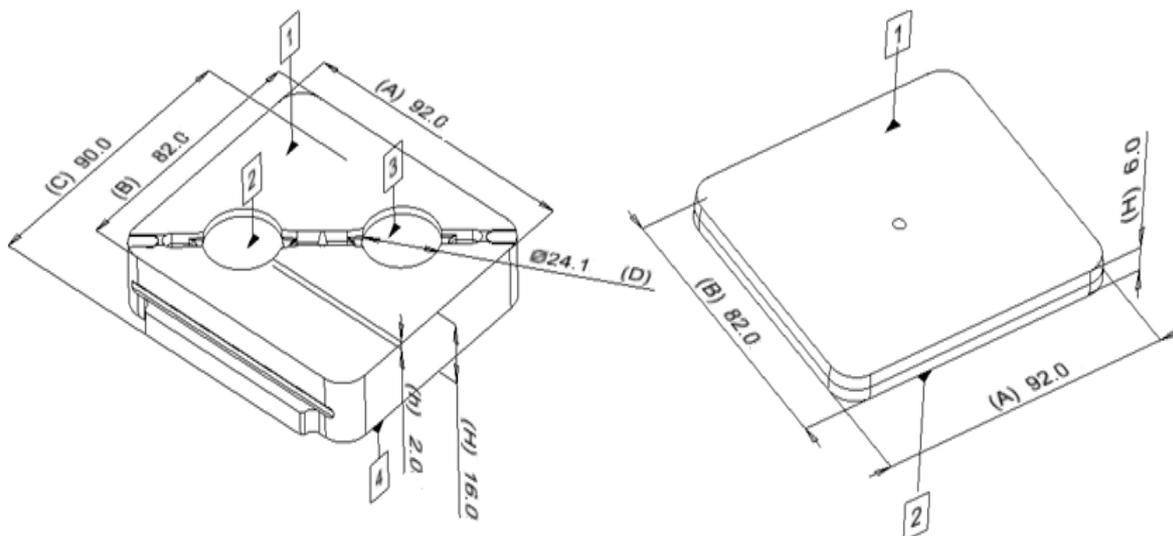


Рисунок 19 – 3D-модели формообразующих деталей – матрицы и пуансона (построены в системе Cimatron)

Для обеспечения надежного контакта поверхностей разъема ФОД необходимо обеспечение плоскостности сопрягаемых поверхностей, обозначенных на 3D-моделях цифрой 1, а также обеспечение параллельности установочных поверхностей, обозначенных на 3D-моделях как 4 и 2 соответственно, сопрягаемым.

Ниже представлена *методика проектирования и изготовления ФОД*.

1. Проектирование 3D-модели отливки, представляющей собой требуемое количество одновременно изготавливаемых полимерных изделий, объединенных литниковой системой, параметры которой (тип и размер профиля сечения и протяженность) определяются на основе справочных данных по 3D-модели полимерного изделия, с учетом проведенного анализа технологичности, используемого ТПМ и выбранной гнездности литьевой формы.

2. Проектирование 3D-моделей ФОД осуществляется на основе 3D-модели отливки и выбранного положения плоскости разреза в пределах габаритных размеров комплекта ФОД выбранной ПЛФ.

3. Многофакторный (отливка-ФОД-ПЛФ) расчет и моделирование процесса литья в САЕ-системе. Загрузка в систему 3D-моделей ФОД и отливки, выбор для каждой 3D-модели соответствующего материала.

4. Анализ результатов расчета САЕ-системы с целью выявления возможных дефектов будущего полимерного изделия.

5. Изменение параметров литниковой системы и/или режимов литья с целью минимизации дефектов (брака при литье) и перерасчета ассоциативно связанных 3D-моделей комплекта ФОД.

6. Анализ результатов расчета САЕ-системы и фиксация оптимальных режимов процесса.

7. Изготовление и контроль комплекта ФОД.

8. Сборка ПЛФ, установка на ТПА.

9. Настройка ТПА, испытание ЛФ.

10. Контроль полимерных изделий.

Информационная поддержка процесса проектирования и изготовления ФОД должна быть реализована на основе унифицированного процесса, содержащего все возможные технологические операции, используемые при изготовлении ФОД. Применение такого унифицированного процесса изготовления ФОД позволяет автоматизировать формирование рабочего процесса путем выбора перечня и конкретных параметров (режимов) для всех необходимых операций. В качестве примера, в таблице 6 представлен унифицированный процесс изготовления ФОД из полимерного материала с использованием аддитивных технологий.

После выбора подходящего для решения текущих задач полимерного материала ФОД происходит обращение к соответствующему столбцу таблицы. После назначения конкретных параметров для всех операций унифицированный технологический процесс преобразуется в рабочий процесс.

Таблица 6 – Унифицированный технологический процесс изготовления ФОД из полимерных материалов с использованием аддитивных технологий

№	Материал	EOS PA2200	Digital ABS Plus	Accura Bluestone	Accura HPC
	Этап процесса				
1	Подготовка 3D-модели ФОД	Проверка геометрии 3D-модели и ее «лечение» Определение расположения 3D-модели на платформе Выбор параметров 3D-печати Генерация слоев 3D-модели			
2	Изготовление (3D-печать)	SLS	PolyJet	SLA	SLA
3	Контроль после 3D-печати	+	+	+	+
4	Постобработка	Режимы Резания (ссылка)	Режимы Резания (ссылка)	Режимы Резания (ссылка)	Режимы Резания (ссылка)
5	Термическая обработка	Не требуется	(ссылка)	(ссылка)	(ссылка)
6	Итоговый контроль	+	+	+	+

Выбор параметров постобработки для конкретного полимерного материала осуществляется путем обращения к строке соответствующей таблицы (таблица 5), ссылка на которую содержится в строке «Постобработка». Выбор необходимых режимов термической обработки в информационной системе также осуществляется путем обращения к файлу с описанием процесса в виде диаграммы (рисунок 20) или к соответствующей таблице (таблица 7), ссылки на которые содержатся в строке «Термическая обработка».

Предоставленные разработчиками режимы термической обработки деталей, изготовленных по технологии SLA и представленных в данном исследовании полимерных материалов, приведены в таблице 7. На рисунке 20 приведена диаграмма термической обработки материала Digital ABS Plus (Stratasys). В обоих случаях необходимо использование климатической камеры (программируемой печи), так как необходимым является обеспечение скорости нагрева и охлаждения деталей 1°C/мин.

Таблица 7 – Режимы термической обработки деталей, изготовленных из полимерных материалов Accura Bluestone и Accura HPC

№	Действие	Обеспечение
1	Обезжирить поверхности ФОД	Спирт этиловый
2	Нанести на поверхности амино-модифицированное силиконовое масло	N-β-(Aminoethyl)-γ-aminopropylmethyl dimethoxysilane (99%) + Octamethylcyclotetrasiloxane (1%)
3	Выдержать 10 минут	
4	Нагреть до температуры 40°C (скорость нагрева 1°C/мин)	Климатическая камера КлиматикПро ТХ-300
5	Выдержать 1 час	
6	Охладить до температуры 23°C (скорость охлаждения 1°C/мин)	
7	Очистить поверхности ФОД	Спирт этиловый
8	Высушить сжатым воздухом	
9	Нагреть до температуры 150°C (скорость нагрева 1°C/мин)	Климатическая камера КлиматикПро ТХ-300
10	Выдержать 2 часа	
11	Охладить до температуры 23°C (скорость охлаждения 1°C/мин)	



Рисунок 20 – Диаграмма повышения теплостойкости Digital ABS Plus

Применение алгоритма выбора полимерного материала ФОД позволяет обратиться к унифицированному технологическому процессу изготовления ФОД, на основе которого разрабатываются рабочие технологические процессы, происходит выбор аддитивной технологии и соответствующей нормативно-справочной информации для назначения режимов операций механической и термической обработки, хранящейся в базе данных интегрированной системы.

3.2 Компьютерное моделирование процесса литья под давлением изделий из термопластичных полимерных материалов

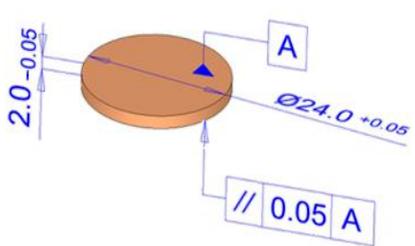
Компьютерное моделирование процесса литья под давлением представляет собой совмещенное использование САД и САЕ-систем для формирования комплекса взаимосвязанных цифровых моделей объекта производства, технологического оснащения и процесса.

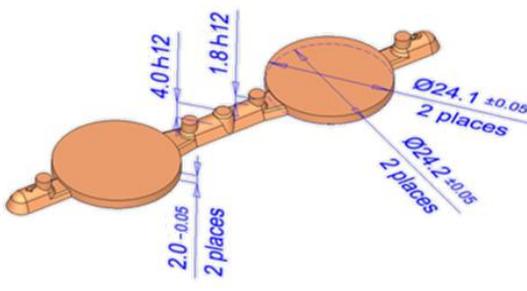
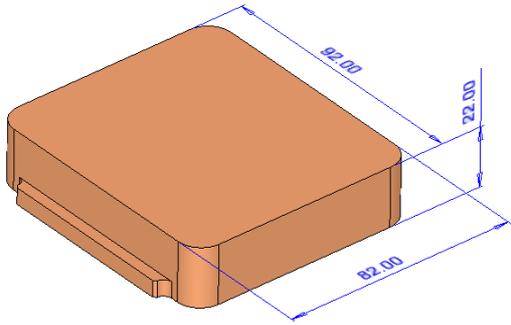
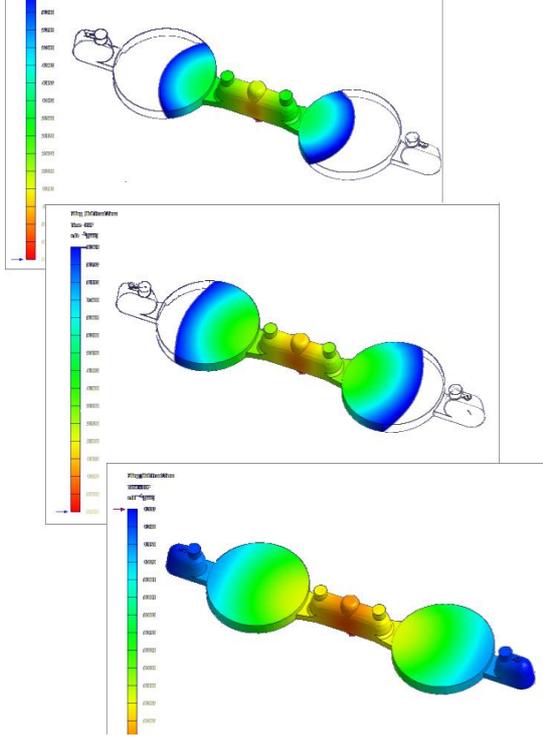
Для имитационного моделирования процесса литья необходимо разработать 3D-модель полимерного изделия, 3D-модели формообразующих вставок и выбрать их материал. При использовании в технологической подготовке литьевого производства ПЛФ, предельные габаритные размеры комплекта сменных ФОД должны быть указаны в качестве атрибутов информационного объекта ПЛФ.

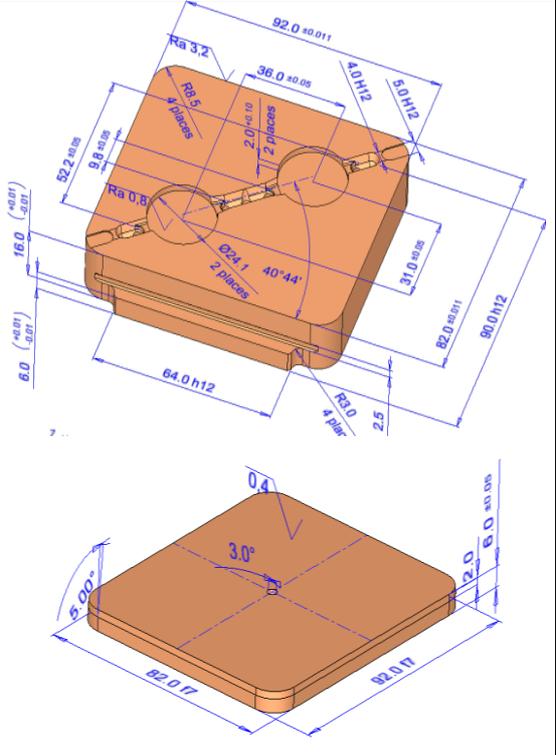
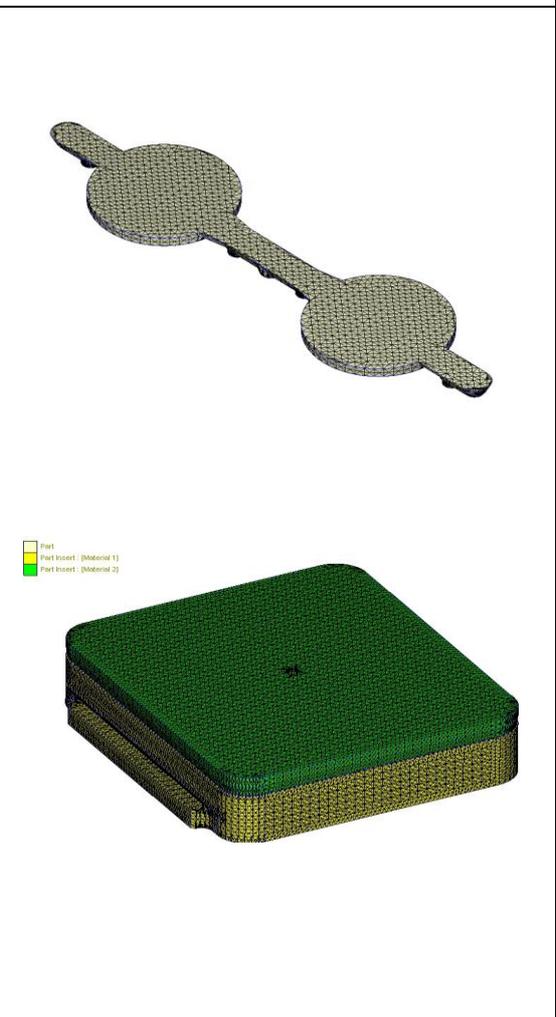
Для повышения степени соответствия результатов имитационного моделирования результатам реального процесса необходимо учитывать параметры литьевого оборудования (ТПА). При этом такие параметры процесса, как скорость впрыска и давление, задаются в процентах от максимально возможных для выбранной модели ТПА.

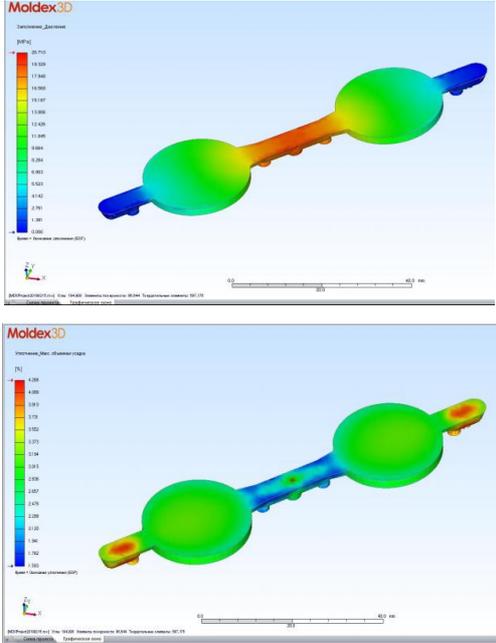
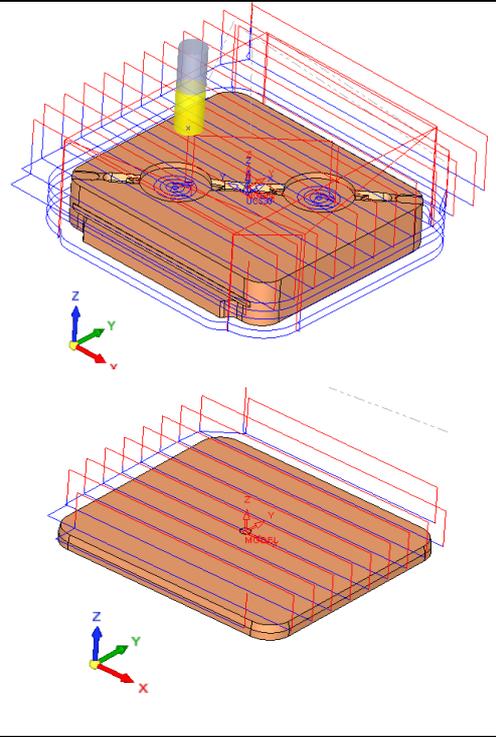
Процесс проектирования 3D-моделей полимерного изделия и необходимого для его изготовления комплекта ФОД представлен в таблице 8.

Таблица 8 – Компьютерное моделирование полимерного изделия и комплекта ФОД

№	Описание действий / результата	Отображение результата в САД/САМ Cimatron и в САЕ Moldex3D
1	<p>Проектирование полимерного изделия.</p> <p>На основе полученной от заказчика конструкторской документации создается трехмерная модель полимерного изделия. На данном этапе также проводится анализ технологичности, анализируются технические требования к изделию, производится согласование всех возможных изменений с заказчиком.</p>	 <p>The image shows a 3D CAD model of a cylindrical part. It includes the following dimensions and tolerances: a diameter of $\varnothing 24.0^{+0.05}$, a height of $2.0^{-0.05}$, and a surface texture symbol $// 0.05 A$ pointing to the top surface. A datum feature symbol 'A' is also indicated on the top surface.</p>

<p>2</p>	<p>Проектирование отливки.</p> <p>С учетом усадки выбранного ТПМ проектируется такая 3D-модель отливки, которая позволит получать одновременно два изделия и производить их извлечение четырьмя толкателями в литники и прибыль, расположенными симметрично с двух сторон от каждого изделия с целью избежать следов от толкателей на рабочих поверхностях «Диска».</p>	
<p>3</p>	<p>Адресация к ПЛФ и определение габаритных размеров комплекта ФОД</p> <p>Определение объема отливки в САД-системе и размеров предельного параллелепипеда позволяет оценить возможность ее размещения в габаритах комплекта ФОД, которые ограничиваются размерами посадочных отверстий в обоймах и толщиной этих плит.</p>	
<p>4</p>	<p>Моделирование «проливаемости» формующей полости</p> <p>С учетом параметров материала полимерного изделия и предполагаемой точки впрыска производится анализ «проливаемости» отливки, определяется положение необходимых для полного заполнения формующей полости вентиляционных каналов.</p> <p>Расчет проводится по созданной в САЕ-системе конечно-элементной сетке полимерного изделия с использованием математической модели ТПМ.</p>	

<p>5</p>	<p>Проектирование рабочего комплекта ФОД.</p> <p>С учетом положения линии разъема и определенных на предыдущем этапе параметров вентиляционных каналов формирующей полости проектируется комплект ФОД: матрица и крышка.</p> <p>Низкая теплопроводность полимерных материалов является причиной нецелесообразности размещения каналов охлаждения в 3D-модели матрицы, поэтому их моделирование не требуется.</p>	 <p>The image shows a 3D CAD model of a mold assembly. The top part is a perspective view of a rectangular block with a central channel. Dimensions include overall width of 92.0 ±0.011, height of 6.0 ±0.011, and various radii (Ra 3.2, Ra 0.8) and chamfers (4.0 H12, 5.0 H12). There are also dimensions for the channel width (36.0 ±0.05) and depth (2.0 ±0.10). The bottom part is a top-down view showing a 3.0° chamfer and a 5.00° angle.</p>
<p>6</p>	<p>Моделирование процесса литья с учетом выбранного материала комплекта ФОД.</p> <p>Спроектированные 3D-модели загружаются в САЕ-систему и для каждой модели создается конечно-элементная сетка.</p> <p>Для каждой модели из базы материалов выбирается и назначается материал.</p> <p>Указывается положение каналов охлаждения в соответствии с параметрами используемой ПЛФ.</p>	 <p>The image shows two 3D mesh models. The top one is a long, thin component with two circular ends, representing a cooling channel. The bottom one is a rectangular block with a central channel, representing the mold assembly. A legend indicates different materials: 'Part' (yellow), 'Part insert: (Material 1)' (green), and 'Part insert: (Material 2)' (orange).</p>
	<p>Назначаются исходные параметры</p>	

	<p>процесса и производится многофакторный расчет процесса литья. Анализ отчета системы о проведенном расчете, представленного в виде результатов стадий процесса позволяет достичь требуемого результата изменением исходных параметров.</p> <p>Совокупность параметров процесса (давление, скорость, температура, время), позволяющая получить полимерное изделие требуемого качества (усадка, коробление, отсутствие дефектов) используется для настройки литьевого оборудования, что сокращает время подбора режимов процесса литья.</p>	
7	<p>Разработка управляющих программ для постобработки комплекта ФОД.</p> <p>3D-модели комплекта ФОД для ПЛФ используются для разработки управляющих программ изготовления деталей фрезерованием или постобработки полимерных ФОД, изготовленных с использованием аддитивных технологий.</p>	

Так как процесс литья под давлением является многофакторным, то оценка результатов расчета представляет собой весьма сложный процесс, требующий участия опытного специалиста с целью анализа рассчитанных системой значений усадки или коробления полимерного изделия и поиска способов их сокращения. Система CAE MolDEX3D позволяет произвести оптимизацию параметров процесса литья с целью сокращения значения выбранного дефекта.

Компьютерное моделирование процесса литья позволяет получить распределение давлений и температур в формующей полости. Сложность расчета эксплуатационной стойкости полимерных ФОД заключается в малоцикловых нагрузках, сочетающих в себе воздействие теплового потока и физическое воздействие расплава (трение, давление и пр.). Если результаты расчета удовлетворяют заявленным к изделию требованиям, то параметры процесса переносятся в технологическую карту литья, и производится настройка ТПА. Схема проекта расчета представлена на рисунке 21.

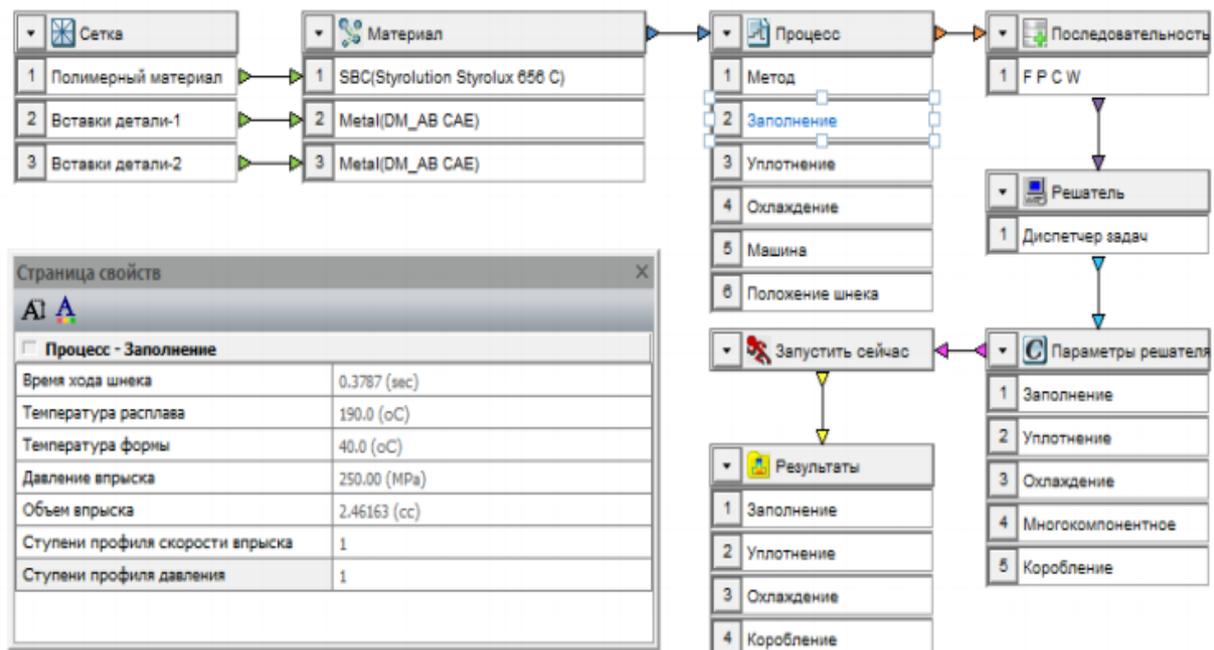


Рисунок 21 – Схема проекта расчета в Moldex3D

При реализации цифровой технологической подготовки производства, позволяющей эффективно управлять жизненным циклом изделия, для цифрового описания продуктов, ресурсов и процессов используются различные типы моделирования. На каждом этапе ЦПП формируются новые модели с учетом параметров моделей, сформированных на предыдущих этапах, и либо подтверждают их, либо требуют создания новой версии с учетом появления новых данных.

Полученный при проведении технологической подготовки литейного производства комплекс взаимосвязанных и согласованных моделей полимерного изделия, полимерных ФОД и процесса литья позволяет еще на этапе проведения компьютерного моделирования процесса литья получить необходимые режимы процесса, которые используются при испытании литейной формы.

3.3 Информационное обеспечение литейного производства

С поступления заказа на изготовление нового изделия из ТПМ начинается ТПП, при этом центральная роль в едином информационном пространстве принадлежит 3D-модели изделия, которая должна быть представлена в системе в виде аннотированной 3D-модели. Наличие аннотаций позволяет формировать необходимые атрибуты информационного объекта, которые можно автоматически преобразовывать в требуемый кортеж параметров, необходимый для создания поискового предписания при поиске необходимых ресурсов для осуществления производственного процесса.

Реализация этапов технологической подготовки литейного производства, характеризующаяся формированием большого количества данных, требует информационного сотрудничества и координации действий специалистов, обладающих различными компетенциями, для чего необходимо создание единого информационного пространства и организация доступа к нему, связанная с распределением прав и ограничений. Организация взаимодействия множества участников требует наличия системы управления процессами, то есть организации *информационно-управляющей среды*. Решение ряда технологических задач требует привлечения территориально удаленных квалифицированных специалистов, что может обуславливать необходимость создания временных расширенных предприятий.

Среди требований к информационно-управляющей среде можно выделить:

1) информационная поддержка процессов технологической подготовки литейного производства, основанная на единых для всех участников базах данных и базах знаний, что позволяет формировать информационные структуры, однозначно понимаемые всеми участниками процесса.

2) гибкий подход к созданию баз данных на основе объектно-ориентированной модели, что позволяет добавлять в проект новые классы информационных объектов, а также проводить корректировку их атрибутов в процессе развития информационно-управляющей среды.

3) возможность накопления и взаимосвязанного хранения информации о характеристиках объектов производства, используемых для их изготовления ресурсов и параметрах реализуемых процессов, что позволяет осуществлять поиск производственных задач-аналогов и тем самым сократить сроки выполнения будущих процессов технологической подготовки производства. Повторное использование данных – основная методология, которая должна применяться для сокращения трудозатрат при разработке новых изделий в любых отраслях промышленности, в том числе в приборостроении.

4) распределение прав доступа к информации и возможность просмотра многочисленных форматов данных. Использование в процессе технологической

подготовки литевого производства множества программных систем, требует возможности просмотра и анализа результатов моделирования и расчетов в соответствии с решаемой задачей и ролью участника процесса.

Информационное обеспечение процессов технологической подготовки литевого производства должно основываться на знаниях, установленных при комплексной обработке всей формируемой в процессе проектирования и изготовления литевой формы конструкторской, технологической, организационной и прочей информации. Совокупность данных о геометрии и материале полимерного изделия, предъявляемых к нему технических и эксплуатационных требованиях, о конструкции и составе литевой формы, о характеристиках литевого и периферийного оборудования, о технологических режимах процесса литья, о результатах контроля и испытаний и др. должна представлять собой единый информационный проект, состоящий из взаимосвязанных информационных объектов. Структура информационного проекта формируется в процессе технологической подготовки литевого производства путем добавления новых информационных объектов и иерархических или логических связей с имеющимися информационными объектами в соответствии с выполняемым этапом подготовки производства.

Для хранения всей совокупности информации целесообразно использовать PDM-системы. Информационные объекты, создаваемые в PDM-системе для работы в конкретной предметной области, могут объединяться с использованием иерархических и логических связей, что позволяет создавать структурированные модели данных, легко настраиваемые под потребности конкретного пользователя системы. Интегрированная система позволяет осуществлять контроль версий документов, статуса информации, быстро находить требуемую версию информационного объекта и получать информацию о том, кем, когда и какие действия над ним производились.

Проект в PDM системе представляется в виде дерева, содержащего всю необходимую для повторной реализации проекта информацию, причем информация, формируемая на различных этапах подготовки литевого производства, может добавляться в структуру проекта автоматически, за счет использования механизма workflow, позволяющего управлять потоком работ, обеспечивая согласованность действий участников проекта в соответствии с текущими (действующими) моделями процесса. Состав типового информационного проекта, по мере выполнения отдельных задач процесса, наполняющегося содержащими соответствующие информационные объекты (документы) разделами, представлен в таблице 9.

Таблица 9 – Состав информационного проекта

Раздел	Содержание
Заказ	Информация, поступившая от заказчика, в виде эскизов, чертежей, описания требований к материалу полимерного изделия, эксплуатационных требований, 3D-моделей и пр.
КД на изделие	Все версии 3D-моделей изделий, создание которых возможно по результатам проведенного анализа технологичности полимерного изделия, уточнений и изменений конструкции при согласовании с заказчиком.
САЕ-анализ	Необходимые для анализа в Moldex3D 3D-модели и отчеты о результатах расчетов.
Конструкторская документация	Ассоциативно связанные 3D-модели: отливки, комплекта ФОД, 3D-модель сборки ПЛФ и модели входящих в сборку деталей.
Технологическая документация	Технологические процессы изготовления деталей литьевой формы, управляющие программы для оборудования с ЧПУ, программы измерений для КИМ, технологический процесс сборки литьевой формы, представленный в виде интерактивного электронного технического руководства (ИЭТР). Технологический процесс подготовки (сушки) ТПМ, технологическая карта литья, технологический процесс удаления литников, технологические процессы контроля и испытаний изделий из ТПМ.
Контроль	Карты контроля всех изготавливаемых деталей литьевой формы, карты контроля полимерных изделий.

Для повышения гибкости технологической подготовки производства при выборе оборудования литьевого и инструментального производства необходимо учитывать состояние выполняемых на текущий момент производственных задач и действующий статус оборудования. Следовательно, реальные объекты производственной системы, представленные в информационной среде в виде конкретных экземпляров информационных объектов класса «Оборудование», должны иметь атрибуты, содержащие динамически обновляемую информацию о своем состоянии (рисунок 22).

Наличие в PDM-системе информации о статусе оборудования позволяет принимать решения с учетом текущей загрузки оборудования, что повышает гибкость производственной системы. При разработке технологических процессов формируются последовательности логических связей информационных объектов «операция – используемое оборудование».

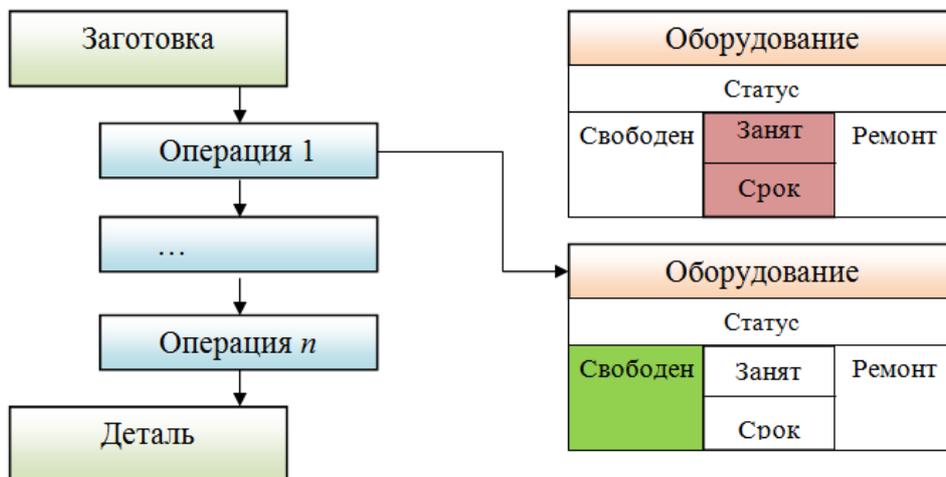


Рисунок 22 – Выбор оборудования при разработке технологического процесса

При необходимости привлечения к технологической подготовке литейного производства сторонних организаций, информация о тех компаниях, сотрудничество с которыми было успешным, заносится в базу данных в виде информационных объектов класса «Исполнитель», соответственно, поиск исполнителя по внутренним базам данных производится в первую очередь.

На рисунке 23 представлена схема выбора материала ФОД, аддитивного оборудования и исполнителя. Она является одной из основных схем процесса информационной поддержки принятия решений при технологической подготовке литейного производства малых серий полимерных изделий с использованием полимерных ФОД, изготавливаемых с применением аддитивных технологий. В случае множества вариантов решений организуется возможность ранжирования вариантов по требуемому признаку (стоимость изготовления, удаленность производственной компании и пр.)

Если же исполнитель для выполнения требуемой производственной задачи не найден во внутренней базе данных, то его поиск можно осуществлять через Интернет, используя онлайн-платформы marketplace. Для удобства выбора компании из представленного списка, как правило, на таких сервисах реализована возможность его ранжирования по трем параметрам: по стоимости изготовления, по срокам выполнения заказа или по территориальной удаленности производственной компании от заказчика.

Формирование производственного заказа при использовании таких онлайн-платформ осуществляется путем выполнения нескольких типовых этапов:

- загрузка 3D-модели требующей изготовления детали в одном из форматов (.stl, .obj, .step, .iges);
- выбор необходимого материала из предлагаемого списка;
- выбор требуемой технологии изготовления детали.

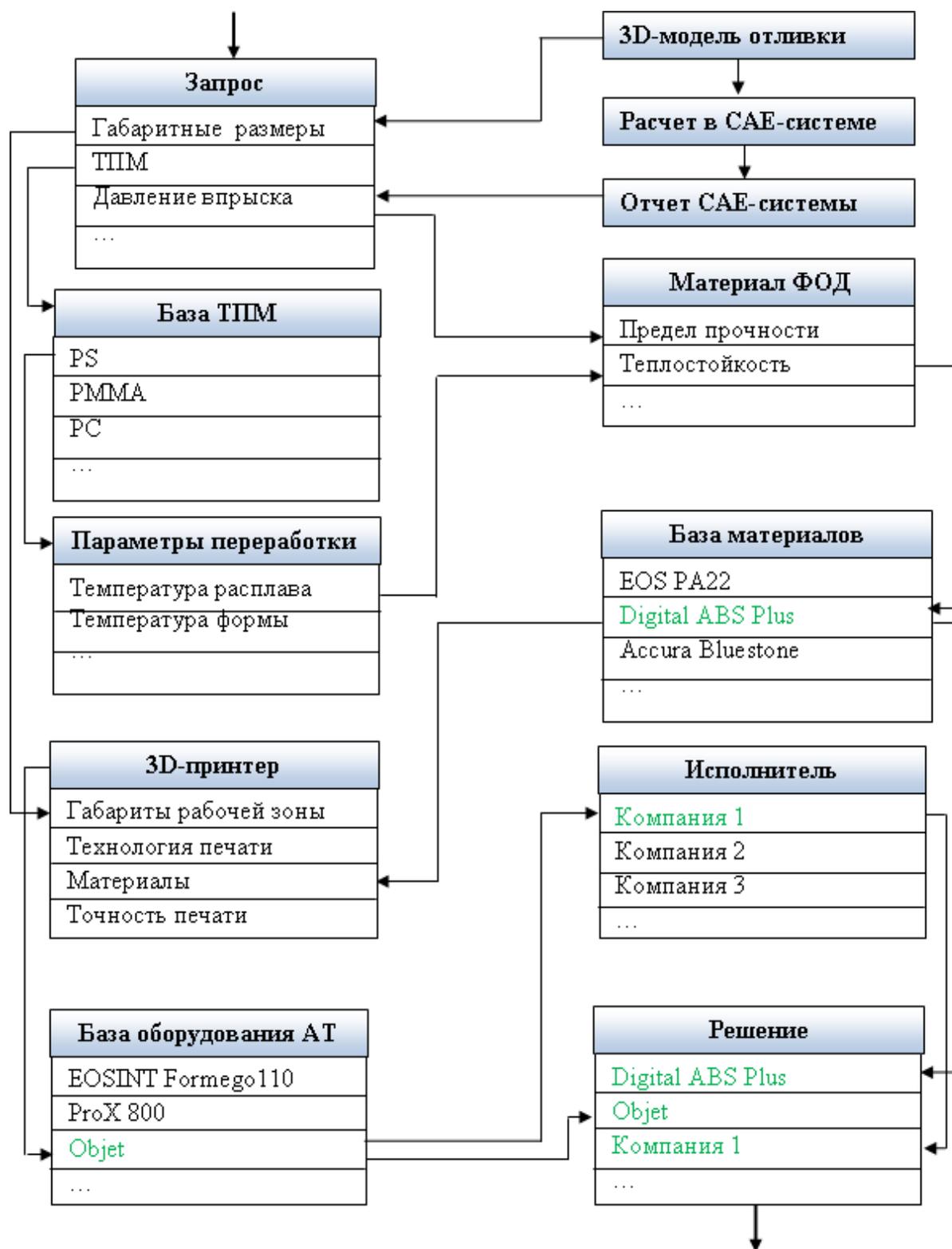


Рисунок 23 – Выбор материала ФОД, аддитивного оборудования и исполнителя

Среди задач технологической подготовки литейного производства, требующих информационной поддержки принятия решений на основе имеющихся знаний (правил), можно также выделить: выбор ПЛФ, выбор необходимого литейного и периферийного оборудования, выбор материала ФОД литейной формы и др. Для решения представленных выше задач каждый из указанных информационных объектов базы данных должен содержать соответствующие атрибуты, позволяющие производить его поиск по сформированному поисковому предписанию, содержащему соответствующий цели поиска набор атрибутов.

Выбор материала ФОД может быть реализован на основе выполнения запроса, формируемого из параметров 3D-модели отливки, параметров ТПМ и результатов расчета САЕ-системы, путем обращения к соответствующим объектам баз данных.

Для расчета требуемого усилия запирающего ТПА необходима информация о площади проекции отливки на плоскость разъема и среднем давлении, возникающем внутри формирующей полости литейной формы в процессе литья. Необходимые для расчета данные можно автоматически получать из соответствующих атрибутов информационных объектов проекта, описывающих соответствующие параметры объектов или процессов, полученных в результате использования САД- и САЕ-систем. Таким образом, все данные, необходимые для автоматического формирования поискового запроса, связанного с выбором ТПА, могут быть получены из комплекса взаимосвязанных компьютерных моделей.

На основе атрибутов информационного объекта «ПЛФ» выбирается возможное литейное оборудование («Термопластавтомат» – (ТПА)) и устанавливается информационная связь с конкретным экземпляром ТПА. Правила выбора технологического оснащения формируются на основе информации, полученной из соответствующих специализированных справочников.

Управление процессами технологической подготовки литейного производства с использованием механизма *workflow* позволяет своевременно оповещать участников процесса о необходимости выполнения того или иного этапа и, в зависимости от ранее принятых решений, направлять и контролировать их деятельность. Создание типовых сценариев работы специалистов позволит обеспечить их информационное взаимодействие при решении задач технологической подготовки производства. Использование систем поддержки принятия решений позволит специалистам сравнивать множество возможных организационных и технологических решений по наиболее важным в текущий момент показателям (стоимость, длительность, количество необходимого оборудования и др.) и выбирать оптимальное.

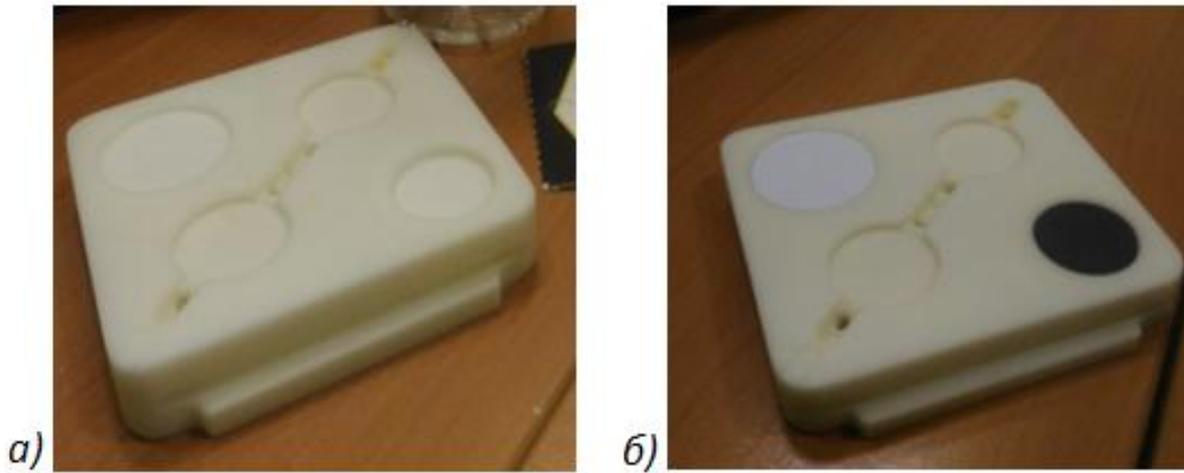
Концепция цифрового литьевого производства предполагает применение цифровых методов планирования, мониторинга и управления производственными процессами. Разработанные цифровые технологические процессы изготовления формообразующих деталей позволяют организовать контроль их выполнения на основе использования механизмов идентификации и прослеживаемости. Например, прослеживаемость выполнения каждой технологической операции многооперационного технологического процесса может быть реализована на основе использования BLE меток (Bluetooth Low Energy), размещенных на таре, в которой заготовки транспортируются от одного типа оборудования к другому.

Время начала и завершения операции, полученное путем мониторинга местоположения метки (ее выхода из зоны или появления в зоне расположения оборудования), позволяет в онлайн режиме отслеживать стадию выполнения технологического процесса. Сопоставление планового времени выполнения операций, занесенного в систему оперативного планирования (MES-систему), со временем, полученным системой мониторинга от приемников сигнала меток или мобильных устройств, позволяет системе управления производственными процессами определять реальное временное отклонение (опережение или отставание) от производственного плана. Анализ текущей ситуации позволяет определить и зафиксировать причину отклонения и внести в онлайн режиме изменения в процесс производства.

Идентификация объектов производства также является эффективным инструментом цифрового производства, так как позволяет осуществить переход к передаче информации в цифровом виде, то есть к безбумажному представлению (описанию) как объектов, так и реализуемых процессов. Рассматриваемое в данном пособии исследование включало изучение возможности применения NFC-меток (Near Field Communication) для идентификации комплектов ФОД. На рисунке 24 представлен процесс подготовки установочных поверхностей и установки различных типов NFC-меток в одну из формообразующих деталей – матрицу.

Процесс литья под давлением, как уже было сказано ранее, происходит в условиях высоких температур и давлений, в связи с чем могут быть сформированы требования к используемым средствам идентификации – NFC-меткам. На рисунке 24 б) показано два типа меток, для которых исследовалась возможность применения: белая – ПВХ метка-наклейка NTAG213 Ø30 мм (рабочая температура 60°C, объем записи 144 байта), черная – корпусированная PPS метка NTAG213 Ø24 мм (рабочая температура 110°C, объем записи 888 байт). В связи с низкой теплопроводностью полимерных материалов, из которых изготовлены формообразующие детали, диапазон рабочих температур меток удовлетворяет условиям эксплуатации этих ФОД. При использовании ФОД, изготовленных из алюминиевых сплавов, требуется проведение анализа

температуры, до которой могут быть нагреты в процессе эксплуатации области установки меток для определения требований к ним.



*Рисунок 24 – Оснащение ФОД NFC-метками:
а) фрезерование установочных углублений;
б) установленные NFC-метки.*

Любое технологическое оснащение, в частности формообразующее (формы, штампы) характеризуется таким параметром, как стойкость – количество рабочих циклов, в течение которых гарантировано получение качественных деталей. Стойкость рассчитывается конструктором при проектировании в зависимости от конфигурации, материала, из которого изготовлено технологическое оснащение и обрабатываемого (перерабатываемого) материала. Стойкость технологической оснастки – важнейший параметр, на основе которого на этапе ТПП рассчитывают ее необходимое количество для изготовления требуемого размера партии изделий. Также технологическое оснащение проходит периодическую поверку (контроль размеров). Результаты поверки и стойкость оснастки заносятся в обязательно оформляемый паспорт. Как правило, такие паспорта оформляют на специальных бумажных бланках и, после изготовления оснастки, вместе с ней передают из подразделения инструментального производства в основное (цех, в котором изготавливаются детали). Также в цех передается технологический процесс изготовления деталей.

Использование средств идентификации (меток), встроенных непосредственно в технологическое оснащение (формообразующие детали литьевых форм), позволяет исключить возможность утраты паспорта или использования несоответствующего технологического процесса. При организации цифрового литьевого производства, на NFC-метке целесообразно хранить ссылку на цифровой паспорт, содержащий описание:

- процесса изготовления комплекта ФОД и места хранения;
- процесса сборки и установки комплекта ФОД в ПЛФ, ПЛФ на ТПА;
- процесса подготовки (сушки) полимерного материала;
- процесса наладки ТПА (рассчитанные в САЕ-системе режимы);
- ресурса ФОД.

Наладчик ТПА, получая заказ на производство литьем под давлением определенного количества изделий из ТПМ, считывает с метки необходимые для настройки процесса данные и загружает их в стойку ЧПУ термопластавтомата. Там же он получает ИЭТР по сборке и установке литьевой формы на ТПА.

На рисунке 25 представлена ФОД с метками, установленная в ПЛФ на ТПА, готовая к процессу литья под давлением.

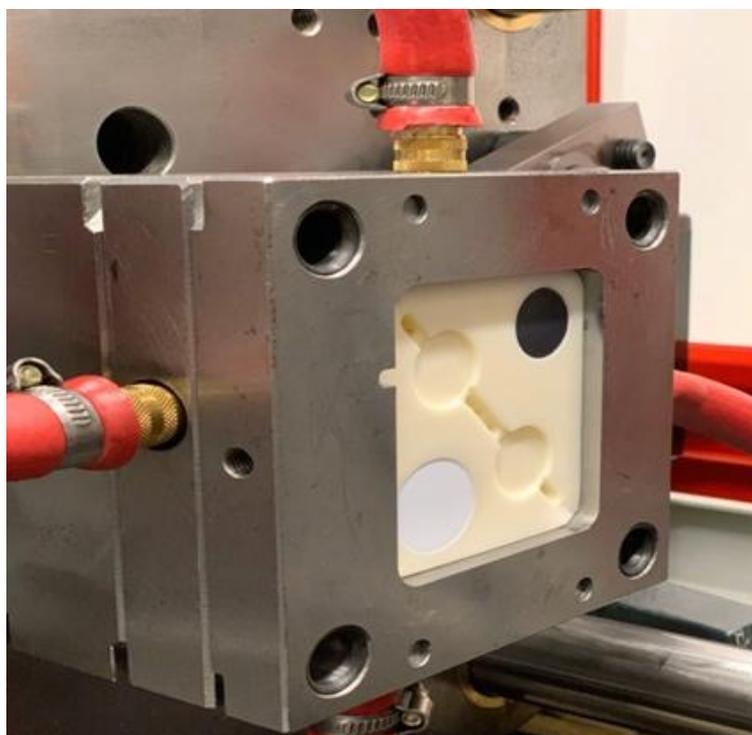


Рисунок 25 – формообразующая деталь – матрица, установленная в переналаживаемую литьевую форму

При мелкосерийном типе производства ресурс формообразующих деталей литьевых форм может быть избыточным для изготовления партии деталей, соответственно информация о ресурсе должна быть динамически обновляемой. ЧПУ система термопластавтомата позволяет считать количество произведенных циклов смыкания литьевой формы (впрысков расплава полимера). Информация, передаваемая со стойки ЧПУ термопластавтомата в систему управления производственным процессом, помимо мониторинга самого процесса литья

требуемой партии изделий, может быть использована для автоматического обновления информационного поля, содержащего информацию о ресурсе формообразующих деталей литьевой формы.

Вопросы для самоконтроля

1. Что представляет собой унифицированная структура иерархической модели данных?
2. Сформулируйте понятия «групповое производство» и «унифицированный технологический процесс».
3. Как может быть описана унифицированная процедура САМ-системы?
4. Какие этапы включает процесс проектирования и изготовления формообразующих деталей литьевых форм?
5. Каким образом унифицированный технологический процесс преобразуется в рабочий технологический процесс?
6. Какие преимущества дает организация единого информационного пространства при проведении технологической подготовки литьевого производства?
7. Какие требования предъявляются к информационно-управляющей среде?
8. В чем заключается информационное обеспечение процессов технологической подготовки литьевого производства?
9. Какой механизм используется для управления процессами технологической подготовки производства?

Заключение

Формирование комплекса взаимосвязанных и согласованных компьютерных моделей, требующее наличия единого информационного пространства, нацелено на описание общей единой модели процесса, учитывающей всю совокупность данных, необходимых для достижения поставленной цели – повышения эффективности технологической подготовки литейного производства. Создание такого комплекса моделей позволяет еще на этапе проведения компьютерного моделирования процесса литья получить необходимые режимы процесса и является неотъемлемым этапом цифровой трансформации.

Исследования в области производства малых серий изделий приборостроения из термопластичных полимерных материалов литьем под давлением являются весьма перспективными. В процессе исследований должны изучаться вопросы эффективного взаимодействия и распределения ролей и задач между исполнителями (специалистами и подразделениями), а также проводиться исследования в области создания интеллектуальных информационных систем управления (систем поддержки принятия решений и экспертных систем) [41, 42]. Проведение научных исследований должно быть основано на применении двухуровневого подхода, связанного с проведением виртуального эксперимента, в процессе которого осуществляется комплексное компьютерное моделирование объектов, технологических процессов и новых материалов, и физического эксперимента. Среди основных направлений исследовательской деятельности можно выделить:

- технологии проектирования и производства полимерных изделий;
- многоуровневое компьютерное моделирование (технологических процессов, производственных процессов, производственных систем);
- организация баз знаний и экспертных систем;
- идентификация объектов производственного процесса и их сетевое взаимодействие;
- мониторинг литейного и периферийного оборудования.

Исследование технологий проектирования и производства полимерных изделий должно быть нацелено на установление зависимостей получаемых характеристик полимерного изделия от совокупности параметров технологической системы «полимерное сырье – литейное оборудование – литейная форма – параметры процесса литья – полимерное изделие»; установление зависимостей получаемых характеристик полимерного изделия от качества поверхностей формообразующих деталей литейных форм, материала, технологии их изготовления и режимов механической обработки, что позволит значительно повысить эффективность подготовки литейного производства.

Исследования в области информационного взаимодействия систем компьютерного моделирования различных уровней позволят осуществлять точное планирование и управление производственной системой на основе данных, последовательно передаваемых от системы к системе. Так, при моделировании процесса литья может быть получена как продолжительность отдельных этапов процесса (впрыск, выдержка под давлением, охлаждение), так и определяться общее время цикла производства полимерного изделия.

Исследование возможности информационного взаимодействия полимерного изделия и литейного оборудования может проводиться на основе мониторинга литейного оборудования с целью получения заданных параметров процесса при конкретном впрыске и информации с датчиков, установленных внутри литейной формы, которые должны записываться в идентификационную метку конкретного экземпляра полимерного изделия исследуемого процесса.

Система моделирования производственных процессов на основе циклограммы литья позволяет смоделировать, например, процессы взаимодействия литейного оборудования, роботов для извлечения полимерных изделий из литейной формы и транспортных роботизированных систем для их перемещения на участок удаления литников и участок контроля качества. С учетом длительности всех процессов (подготовки полимерного сырья, литья под давлением, транспортировки изделий, удаления литников и контроля) может быть рассчитана длительность изготовления требуемой партии изделий. Передача этих данных на верхний уровень позволяет моделировать деятельность всей производственной системы с целью изучения процессов управления.

Обеспечение доступа ко всему объему конструкторско-технологической информации на уровне производственных подразделений, применение технологий идентификации и прослеживаемости позволяет передавать данные о реальном состоянии производственной системы на уровень управления и планирования производственных процессов. Организация процессов производства на основе результатов всеобъемлющего их предварительного моделирования с целью гарантированного получения заданного количества полимерной продукции требуемого качества – необходимое условие цифровой трансформации, перехода к концепции цифрового литейного производства.

Библиографический список

1. Цифровое производство: методы, экосистемы, технологии. Рабочий доклад Департамента корпоративного обучения Московской школы управления «Сколково» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.skolkovo.ru/odm3.
2. Интеллектуальные программные комплексы для технической и технологической подготовки производства / Д. Д. Куликов, С. О. Носов, Н. Е. Филюков, Е. И. Яблочников Ч. 10. Технологическая интегрированная система. СПб.: Ун-т ИТМО, 2016. – 43 с.
3. Барвинский И. Экспертиза инженерных расчетов литья термопластов под давлением// Полимерные технологии, 2018. – № 2, – С. 22-29.
4. Дувидзон В. Г. Принципы модернизации литьевого производства изделий из полимерных материалов // Полимерные материалы, 2016. – № 6. С. 32–37.
5. Как делать литьевые формы / Г. Менгес, В. Микаэли, П. Морен; пер. с англ. 3-го изд. под ред. В. Г. Дувидзона и Э. Л. Калинчева. - СПб. : Профессия, 2007. - 639 с., ил.
6. Казмер Д.О. Разработка и конструирование литьевых форм / Пер. с англ. под ред. В.Г. Дувидзона. — СПб.: Профессия, 2011. – 464 с.
7. Литье пластмасс под давлением / Т.А. Освальд, Л.-Ш. Тунг, П. Дж. Грэмман; под ред. Э.Л. Калинчева – СПб.: Профессия, 2008. – 712 стр., ил.
8. Яблочников Е.И., Грибовский А.А., Афанасьев М.Я., Куликов Д.Д. Методы и системы ИПИ-технологий. Учебное пособие – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 64 с.
9. ГОСТ 14.004-83. Межгосударственный стандарт. Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий.
10. Р 50-54-11-87. ЕСТПП. Общие положения по выбору, проектированию и применению средств технологического оснащения. Рекомендации.
11. Аюпова Р.И., Пелипенко А.Б. Современное состояние и тенденции развития отечественной инструментальной промышленности // САПР и графика, 2013. – №12, – С.30 – 32.
12. Тимофеева О.С., Помпеев К.П., Дувидзон В.Г., Яблочников Е.И. Концепция технологической подготовки литьевого производства с использованием новых информационных и производственных технологий. Металлообработка, 2017. – № 5 (101), – С.21-28.
13. Технологическая подготовка гибких производственных систем / С.П. Митрофанов, Д.Д. Куликов, О.Н. Миляев, Б.С. Падун: Под общ. ред. С.П. Митрофанова. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. – 352 с.: ил.
14. Яблочников Е.И., Пирогов А.В., Грибовский А.А. Совместное применение аддитивных технологий и систем виртуального моделирования при

- подготовке производства полимерных изделий // Приборостроение, 2014. – №5. – С. 72-76.
15. Андреев Ю.С., Тимофеева О.С., Яблочников Е.И. Проектирование и изготовление формообразующей оснастки в условиях мелкосерийного производства // Известия высших учебных заведений. Приборостроение, 2016. – Т. 59, – № 7, – С. 592-599.
 16. Барвинский И.А., Дувидзон В.Г. «Конформные» системы охлаждения литьевых форм, изготовленные с использованием аддитивных технологий. [Электронный ресурс] Материалы 3-й международной специализированной конференции по аддитивным технологиям. Москва. 29 - 31 января 2019 г., Режим доступа: http://www.barvinsky.ru/articles/art_076_conformal_cooling.htm.
 17. Бояринцев А.В., Дувидзон В.Г., Подсобляев Д.С. Быстрое изготовление пилотных серий деталей из термопластичных полимерных материалов. // Полимерные материалы, 2013. – №6, – С. 4-9.
 18. F.M. Poehler, S. Bauer, T. Feucht. “3D Printing Form-building Parts in Moulds for Small-scale Production”. Kunststoffe 108 (2018) 11, pp. 4–9.
 19. M.A. LeÓN-Cabezas, A. Martinez-Garcia, F.J. Varela-Gandia. “Innovative advances in additive manufactured moulds for short plastic injection series”. / Manufacturing Engineering Society International Conference/ Procedia Manufacturing vol. 13 (2017) pp. 732 – 737.
 20. Яблочников Е.И., Молочник В.И., Фомина Ю.Н., Саломатина А.А., Гусельников В.С. Методы управления жизненным циклом приборов и систем в расширенных предприятиях // Учебное пособие – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 148 с.
 21. Рыбаков А.В., Евдокимов С.А., Краснов А.А. Создание системы автоматизированной поддержки информационных решений при проектировании технологической оснастки / А.В. Рыбаков, С.А. Евдокимов, А.А. Краснов. – М.: ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2013. – 162 с.: ил.
 22. Официальный сайт компании АСКОН, [Электронный ресурс], Режим доступа: <https://ascon.ru/> Дата обращения: 17.10.2021
 23. Официальный сайт компании Топ Системы, [Электронный ресурс], Режим доступа: <https://www.tflex.ru/> Дата обращения: 17.10.2021
 24. Программное обеспечение Cimatron. [Электронный ресурс], Сайт Группы компаний Би Питрон. Режим доступа: <http://beepitron.com/soft-products/cimatron/>. Дата обращения: 17.10.2021
 25. Дувидзон В. Г. Оптимизация гнездности литьевых форм и типоразмера ТПА. // Полимерные материалы, 2018. – №6, – С. 4-12.
 26. Барвинский И. А. Основы инженерных расчетов литья термопластов: технологические параметры// CADMASTER, 2015. – №2, – С.70-77.

27. Барвинский И. А. Экспертиза инженерных расчетов литья термопластов под давлением // Полимерные технологии, 2018. – № 2, – С. 22-29.
28. Сайт компании Moldex3D. [Электронный ресурс], Режим доступа: <https://www.moldex3d.com>. Дата обращения: 17.10.2021
29. Программное обеспечение Delmia. [Электронный ресурс], Сайт Группы компаний Би Питрон. Режим доступа: <http://beepitron.com/soft-products/delmia/>. Дата обращения: 17.10.2021
30. M. Lopes Nunes, A.C. Pereira, A.C. Alves. Smart products development approaches for Industry 4.0 / Manufacturing Engineering Society International Conference 2017, Procedia Manufacturing vol. 13 (2017) pp. 1215–1222.
31. Энгледер Ш., Диммлер Г. Что такое Industry 4.0 для производителя литьевых машин // Полимерные материалы, 2016. – №2, – С.28-31.
32. Энгледер Ш. «Умный» завод с концепцией Inject 4.0. // Пластикс, 2015. – №11 (151), – С.24-25.
33. Демкович Н.А., Абаев Г.Е., Яблочников Е.И. Многоуровневое моделирование цифровых производств. // РИТМ машиностроения, 2018. – №7, –С.20-27.
34. Е. И. Яблочников, А. В. Пирогов, Ю. С. Андреев. Автоматизация технологической подготовки производства в приборостроении. – СПб: Университет ИТМО, 2018. – 118 с.
35. Попов С. «Большие данные» в промышленности: как обеспечить максимальную выгоду от инноваций. // Control Engineering. Россия, 2017. – №1 (67), – С.70-72.
36. Кулагин М., Волков И. Промышленный интернет на практике: удаленная диагностика станков с ЧПУ с помощью технологии Winnum // CAD/CAM/CAE Observer, 2016. – № 6, – С. 20–25.
37. Б. Хеннрих, Э. Краус. Сталь или алюминий – вот в чем вопрос. Полимерные материалы, 2016. – №6, – С.10-14.
38. Тимофеева О.С., Дроздов А.Г., Яблочников Е.И. Цифровая подготовка литьевого производства // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И.Раззакова, 2018. – Т. 46, – № 2, – С. 100-108.
39. Куликов Д.Д., Носов С.О. Применение табличного процессора для решения технологических задач // Известия вузов. Приборостроение, 2016. – Т. 59, – № 10, – С. 874-879.
40. Назаров Э.Х., Талапов В.В., Тимофеева О.С., Помпеев К.П., Яблочников Е.И. Определение параметров оборудования и литьевой оснастки при автоматизированной технологической подготовке производства изделий из термопластичных полимерных материалов. // Металлообработка, 2017. – № 6(102), – С. 43-50.

41. A. V. Chukichev, O. S. Timofeeva, E. I. Yablochnikov and A. W. Colombo. Industrial Cyber-Physical Platform for small series production of polymer parts // 2020 IEEE Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS), Tampere, 2020, pp. 209-214.
42. Yablochnikov E., Chukichev A., Timofeeva O., Abyshev O.A., Abaev G.E., Colombo A. Development of an Industrial Cyber-Physical Platform for Small Series Production using Digital Twins // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences –2021, Vol.379, No.2207, pp.20200370.

Содержание

1. Методы и средства решения задач технологической подготовки	
литьевого производства	5
1.1 Технологическая подготовка литейного производства	
и используемые производственные технологии	5
1.2 Технологическая подготовка литейного производства	
и используемые компьютерные технологии	13
1.3 Цифровое литейное производство как тенденция развития	
полимерной отрасли	21
Вопросы для самоконтроля	27
2. Интегрированная информационно-технологическая среда	
литьевого производства	28
2.1 Организация технологической подготовки литейного производства	
в интегрированной информационно-технологической среде	28
2.2 Оценка эффективности процессов технологической подготовки	
литейного производства с использованием методов имитационного	
моделирования	38
2.3 Применение аддитивных технологий при изготовлении	
формообразующих деталей литейных форм	45
Вопросы для самоконтроля	53
3. Методики и модели цифровой технологической подготовки	
литейного производства	54
3.1 Унифицированный процесс проектирования и изготовления	
формообразующих деталей литейных форм	54
3.2 Компьютерное моделирование процесса литья под давлением	
изделий из термопластичных полимерных материалов	62
3.3 Информационное обеспечение литейного производства	67
Вопросы для самоконтроля	76
Заключение	77
Библиографический список	79

Тимофеева Ольга Сергеевна
Яблочников Евгений Иванович

**Технологическая подготовка цифрового производства
изделий из термопластичных полимерных материалов**

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А