

## ЦИФРОВАЯ ПОДГОТОВКА ЛИТЬЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Тимофеева Ольга Сергеевна, аспирант, Университет ИТМО, Россия, Санкт-Петербург, 197101, Кронверкский пр. д.49, e-mail: [otimofeeva@corp.ifmo.ru](mailto:otimofeeva@corp.ifmo.ru)*

*Дроздов Александр Геннадьевич, аспирант, Университет ИТМО, Россия, Санкт-Петербург, 197101, Кронверкский пр. д.49, e-mail: [aleks@corp.ifmo.ru](mailto:aleks@corp.ifmo.ru)*

*Яблочников Евгений Иванович, к.т.н., доцент, Университет ИТМО, Россия, Санкт-Петербург, 197101, Кронверкский пр. д.49, e-mail: [yablochnikov@corp.ifmo.ru](mailto:yablochnikov@corp.ifmo.ru)*

**Аннотация.** В статье рассматривается технологическая подготовка литейного производства как унифицированный процесс, состоящий из ряда этапов. Приведен список задач и предполагаемых результатов их решения. Описываются методы цифровой подготовки литейного производства с использованием результатов расчетов систем автоматизированного проектирования и инженерного анализа для имитационного моделирования производственного участка.

**Ключевые слова:** литейное производство, технологическая подготовка производства, имитационное моделирование, литейная форма, литье под давлением, CAD/CAM-система, CAE-система, информационная модель

## DIGITAL PREPARATION OF THE INJECTION MOLDING PRODUCTION

*Timofeeva Olga*, postgraduate student, ITMO University, Russia, Saint Petersburg, 197101, Kronverksky Pr., 49, e-mail: [otimofeeva@corp.ifmo.ru](mailto:otimofeeva@corp.ifmo.ru)

*Drozdov Alexander*, postgraduate student, ITMO University, Russia, Saint Petersburg, 197101, Kronverksky Pr., 49, e-mail: [aleks@corp.ifmo.ru](mailto:aleks@corp.ifmo.ru)

*Yablochnikov Eugeny*, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, ITMO University, Russia, Saint Petersburg, 197101, Kronverksky Pr., 49, e-mail: [yablochnikov@corp.ifmo.ru](mailto:yablochnikov@corp.ifmo.ru)

**Abstract.** The article considers the technological preparation in injection molding production as a unified process consisting with number of steps. The list of tasks and the expected results about their solution is given. The methods of digital preparation in injection molding production using results of calculations computer-aided design and engineering analysis systems for simulation of the manufacturing site are described.

**Keywords:** injection production, technological preparation of production, simulation modeling, injection mold, injection molding, CAD/CAM-system, CAE- system, information model

### Введение

Целью технологической подготовки производства (ТПП) является оптимальное с точки зрения сроков, стоимости и используемых ресурсов обеспечение готовности производства к изготовлению изделий. Технологическая подготовка литьевого производства, помимо своевременного предоставления основному производству средств технологического оснащения, представляет собой подготовку информационного и технического обеспечения, а также формирование принципиальных технологических и организационных решений. Для конкурентоспособности предприятий, ориентированных на данный тип производства, одной из важнейших задач является сокращение длительности и стоимости ТПП.

Тенденция к переходу от массового типа производства, характерного для выбора технологии литья под давлением, к малым сериям, требует от предприятий высокой гибкости и быстрого перехода с выпуска одного типа продукции на другой. Цифровое производство – концепция, позволяющая эффективно управлять жизненным циклом изделия, за счет полного цифрового описания производственных процессов и управления информацией [1, 2]. Создание цифровых моделей изделий, включающих информацию обо всех процессах, необходимых для их изготовления, а также используемых ресурсах позволит сократить сроки ТПП новых изделий за счет более эффективного планирования производства.

Литьевое производство, по сравнению с другими типами производств, включает в себя множество технологических процессов - изготовления литьевой формы, сборки, контроля и испытания; литья изделий из термопластичных полимерных материалов (ТПМ) на термопластавтомате (ТПА), отрезки литников и контроля отливок. Таким образом, при технологической подготовке литьевого производства формируется множество информационных моделей, которые должны взаимосвязано храниться в единой цифровой информационной системе [3].

### Этапы и задачи технологической подготовки литьевого производства

Изготовление литьевой формы является наиболее длительным и дорогостоящим этапом технологической подготовки литьевого производства. Традиционно, ошибки, допущенные на стадии проектирования, часто выявляются только после пробного литья и контроля изделий. Если принимается решение о невозможности доработки литьевой формы, то создание извещений об изменении конструкции, внесение изменений в чертежи, повторное изготовление формообразующих деталей значительно увеличивает сроки от

поступления заказа до получения качественной готовой продукции. Применение CAD/CAM и CAE-систем позволит избежать ошибок проектирования, и сократить время за счет имитации процесса литья еще до изготовления формообразующих деталей, проанализировать точки впрыска расплава и оптимизировать их расположение в зависимости от требований к изделию (как можно меньшее коробление, отсутствие воздушных ловушек и пр.) [4]. Цифровая технологическая подготовка производства позволит смоделировать и оценить весь производственный цикл еще до запуска реального производства, что значительно сократит ее стоимость.

В данной работе использовалось программное обеспечение CAD/CAM CimatronE (3D Systems) для проектирования технологической оснастки и разработки управляющих программ для станков с ЧПУ, CAE Moldex3D (CoreTech System) для проектирования и анализа технологических процессов литья изделий из термопластичных полимерных материалов, DELMIA (3DS Dassault Systèmes) для проектирования, планирования и оптимизации производственных процессов. Данные, полученные в результате использования этих систем должны храниться в единой информационной системе, в качестве которой выбрана PDM-система ENOVIA Smarteam (3DS Dassault Systèmes).

Процессы автоматизации подготовки производства необходимо сопровождать постоянной работой по унификации технических решений, анализу задач, решаемых на всех этапах. В целом технологическую подготовку литьевого производства можно представить как унифицированный процесс, включающий последовательность этапов и задач. В таблице также приведены результаты, получаемые на каждом этапе.

Процесс ТПП носит итерационный характер, данные и модели уточняются и дополняются в процессе подготовки производства. От результатов, полученных на каждом из этапов зависит эффективность всего производственного процесса. Решение задач сопровождается использованием различных баз данных оборудования, материалов, инструментов, оснастки и других. Перспективным направлением является разработка онтологии данной предметной области и организации на ее основе базы знаний, содержащей правила принятия технических решений на всех этапах [5].

Таблица. Этапы технологической подготовки литьевого производства

<b>Этап</b>	<b>Решаемые задачи</b>	<b>Результат</b>
Получение заказа	Изучение документации и технических требований к изделию Создание/изучение 3D-модели изделия	3D-модель изделия
Анализ технологичности	Оценка максимальной и минимальной толщины стенки, разнотолщинности Проверка наличия скруглений углов и технологических уклонов Изменение 3D-модели изделия и согласование ее с заказчиком (при необходимости) Выбор/оценка выбора ТПП Определение технологии литья	3D-модель изделия (версия 2) Код ТПП

Проектирование отливки и формообразующих деталей	<p>Проектирование отливки с учетом усадки полимерного материала и числа гнезд литьевой формы <math>n</math> (несколько вариантов <math>n = 1, 2, 4, 6, \dots</math>)</p> <p>Проектирование литниковой системы и точки (точек) впрыска расплава</p> <p>Определение положения плоскости разъема</p> <p>Определение площади проекции отливки на плоскость разъема (<math>S_n</math>)</p> <p>Определение объема формообразующей полости (<math>V_n</math>)</p> <p>Определение габаритных размеров формообразующей полости (<math>X_n, Y_n, Z_n</math>) для всех вариантов гнездности</p> <p>Проектирование системы охлаждения и выталкивания</p> <p>Определение габаритных размеров формообразующих деталей (ФОД)</p> <p>Определение габаритных размеров литьевой формы (<math>X_f, Y_f, Z_f</math>)</p> <p>Расчет в САЕ-системе процесса заполнения различных вариантов гнездности</p>	<p>3D-модель отливки <math>S_n, \text{см}^2</math>, при <math>n=1, 2, \dots</math></p> <p><math>V_n, \text{см}^3</math> для всех <math>S_n</math></p> <p><math>X_n, Y_n, Z_n, \text{см}</math></p> <p><math>X_f, Y_f, Z_f, \text{см}</math></p> <p>3D-модели ФОД</p> <p>САЕ – отчет (режимы процесса литья и время)</p> <p>Технологическая карта литья</p>
Выбор технологического оборудования	Определение необходимого типа оборудования и периферийных устройств	3D-модель ТПА 3D-модели периферийных устройств
Разработка конструкции литьевой формы (ЛФ)	Детальная разработка литьевой формы (выбор стандартных и разработка уникальных деталей)	3D-модель ЛФ Спецификация
Определение режима работы	Выбор робота для снятия отливок с ТПА Проектирование модели схвата Проектирование траекторий перемещений Проектирование транспортной системы	3D-модель робота 3D-модель схвата
Разработка технологических процессов изготовления и сборки ФОД и ЛФ	Определение материала ФОД в зависимости от материала изделия, точности и серийности Выбор оборудования для изготовления ФОД Разработка управляющих программ для оборудования с ЧПУ	Код материала ФОД Файл ЧПУ 3D-модели оборудования и оснастки Интерактивная инструкция сборки
Разработка технологических процессов контроля ФОД и изделий	Разработка управляющих программ для КИМ Разработка контрольных карт	Программы контроля КИМ
Разработка технологического процесса отрезки литников	Выбор оборудования и оснастки для отрезки литников	3D-модель оборудования Технологический процесс
Разработка планировки литьевого участка	Имитационное моделирование и оценка эффективности производственного процесса	3D-модель литьевого участка

### Применение систем компьютерного моделирования

В качестве примера цифровой подготовки литьевого производства было взято изделие “Диск защитный” из полистирола, 3D-модель которого представлена на рис. 1а. Технические требования к данному изделию обуславливают отсутствие следов от толкателей на поверхностях диска, поэтому отливка проектировалась с прибылями, и было выбрано соответствующее положение толкателей. 3D-модель отливки представлена на рисунке 1б.

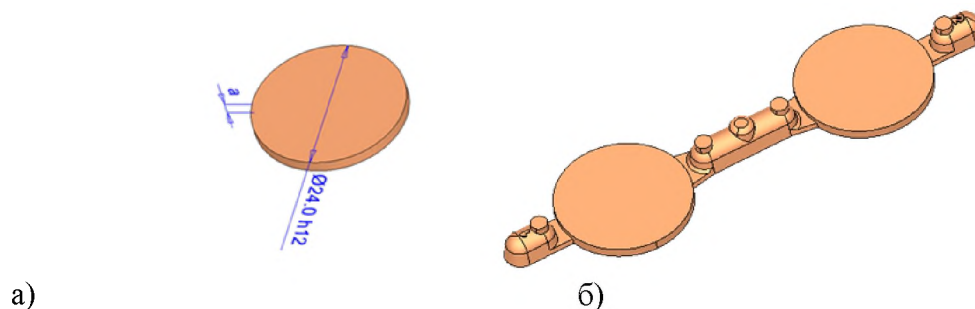


Рисунок 1. 3D-модель изделия и отливки

На следующем этапе на основании геометрии отливки проектируется комплект формообразующих деталей (матрицы и пуансона) и литейной формы, 3D-модели которых представлены на рис.2. Так как разрабатываемая в единой CAD/CAM-системе 3D-модель ассоциативно связана с файлом ЧПУ (САМ-модуль), то выполнение этапов анализа в САЕ-системе и разработка управляющих программ может вестись параллельно.

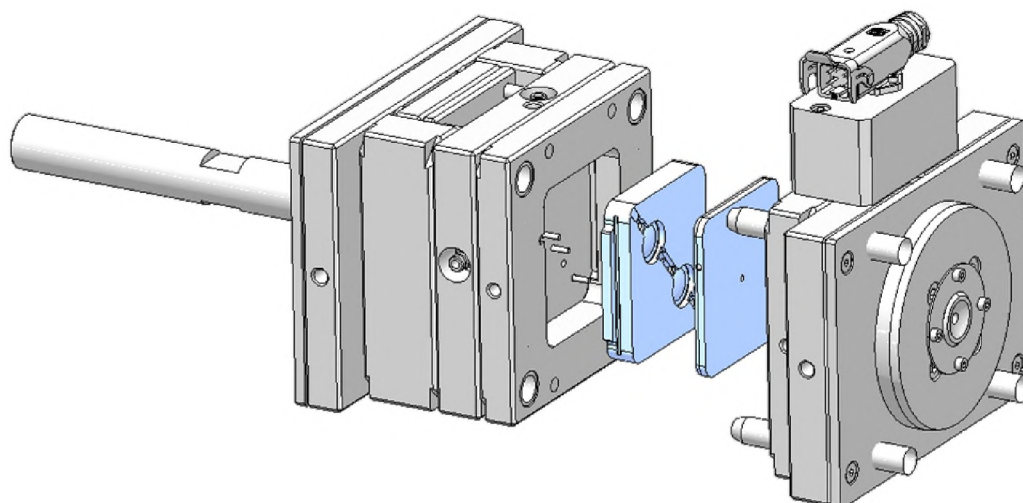


Рисунок 2. 3D-модели формообразующих деталей и литейной формы

Если необходимы тестовые образцы изделий для полномасштабных натурных испытаний, то параллельно с проектированием формообразующей оснастки для серийного производства можно изготовить формообразующие детали из неметаллического материала, способного выдержать литье «пилотной» серии отливок в количестве  $100 \pm 50$  штук. Такие формообразующие детали можно изготовить с использованием аддитивных технологий (на 3D-принтерах) в кратчайшие сроки, установить их в переналаживаемую литейную форму и провести пробное литье [6, 7].

Расчет процесса заполнения формообразующей полости в САЕ-системе можно проводить как с учетом выбранного оборудования (то есть в процессе расчета будут учтены технологические параметры ТПА, такие как, например, максимальная скорость и объем впрыска), так и без его учета. Полученные данные в результате расчета можно использовать для уточнения выбора подходящего ТПА. Для расчета необходимы данные о материале будущего изделия и модель отливки. Модель отливки экспортируется из САД-системы в формате, необходимом для формирования конечноэлементной сетки. В результате расчета можно оценить такие важные для подготовки производства технологические параметры

процесса литья как время впрыска, время выдержки под давлением, время охлаждения до температуры, при которой возможен съем изделия. На основе этих параметров можно составить циклограмму литья и использовать ее при дальнейшей подготовке производства для имитационного моделирования схемы взаимодействия оборудования литейного участка и оценки эффективности производства. Некоторые результаты расчетов в САЕ-системе и циклограмма процесса представлены на рисунке 3.

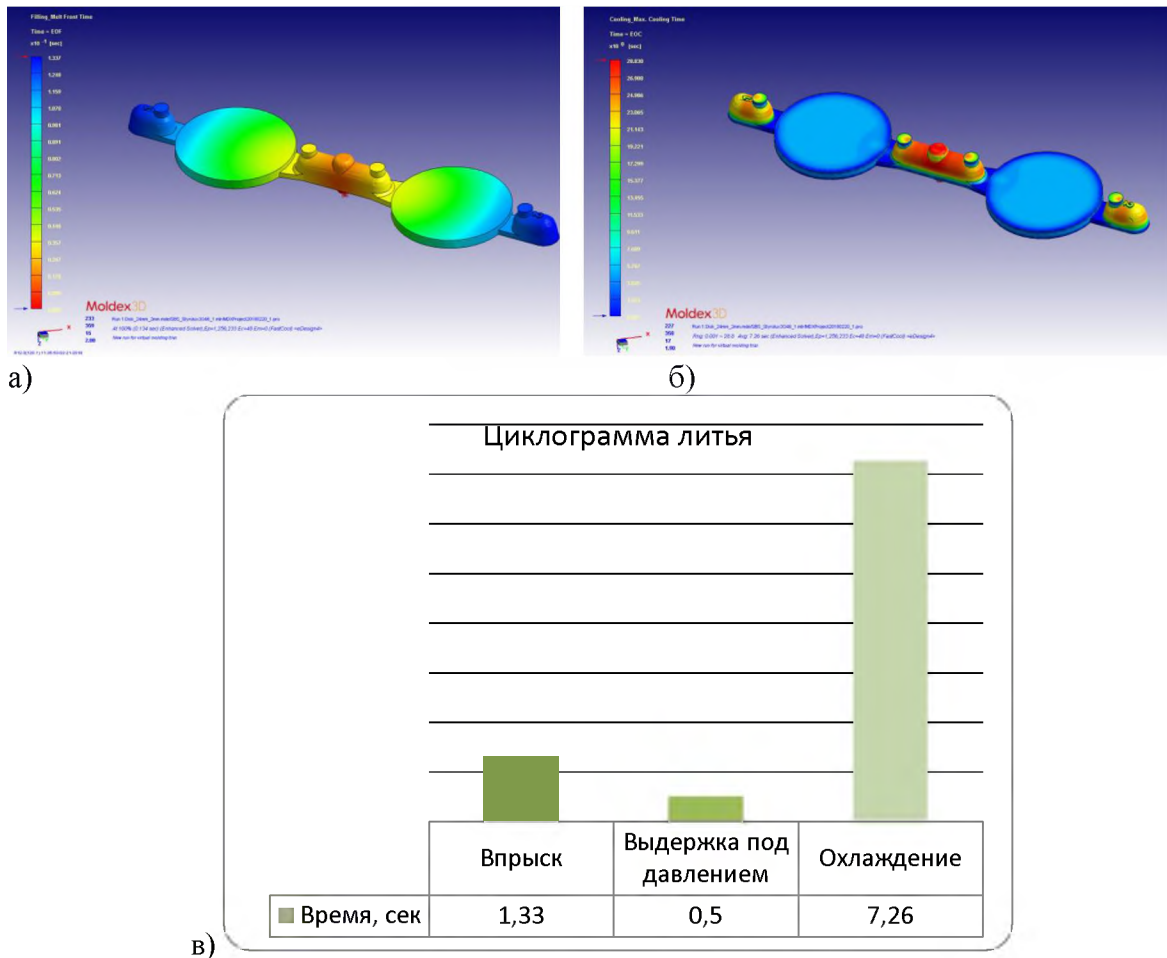


Рисунок 3. Расчет времени впрыска (а), времени охлаждения (б) в САЕ-системе Moldex3D, циклограмма литья (в)

Использование CimatronE для разработки конструкции литейных форм позволяет сократить сроки проектирования за счет того, что весь процесс от создания линии разреза до полной сборки формы, а также разработка программ для станков с ЧПУ выполняется в единой среде. При таком подходе к проектированию сокращается вероятность выявления ошибок изготовления деталей при сборке литейной формы за счет автоматической генерации конструкторской документации для деталей, входящих в сборочную единицу. CimatronE содержит библиотеки стандартных деталей литейных форм (DME, Hasco, Futaba/Misumi и др.), которые используются при проектировании формопакета. Автоматическое создание спецификаций позволяет выявлять уникальные детали, которые подлежат изготовлению на предприятии, и эффективно планировать загрузку оборудования. 3D-модель литейной формы используется также для создания интерактивной инструкции по ее сборке.

Для полноты описания информационной модели проектируемого процесса в работе было выполнено имитационное моделирование в системе DELMIA, что позволило получить: диаграмму Ганта, показывающую такты циклов всех операций, производимых литейным



участком за определенный период работы; среднее время изготовления отливки; степень загрузки элементов ячейки в процентах и пр.

Имитационное моделирование роботизированной ячейки литья под давлением заключается в моделировании отдельных элементов (ТПА, роботы, схваты, транспортные линии и пр.), определении схемы взаимного расположения элементов с учетом планировки производственного помещения, составлении временных циклов работы всей системы на основании циклограммы непосредственно технологического процесса литья. Для реализации этой цели для каждого устройства создаются и описываются виртуальные контроллеры, которые позволяют организовать связи между устройствами на уровне входных и выходных сигналов. Для обеспечения своевременного выполнения задач различными устройствами, входящими в систему, вводятся переменные, инициирующие или останавливающие движение исполнительных механизмов этих устройств.

На рисунке 4 представлена модель производственной роботизированной ячейки для литья под давлением изделий из полимерных материалов.

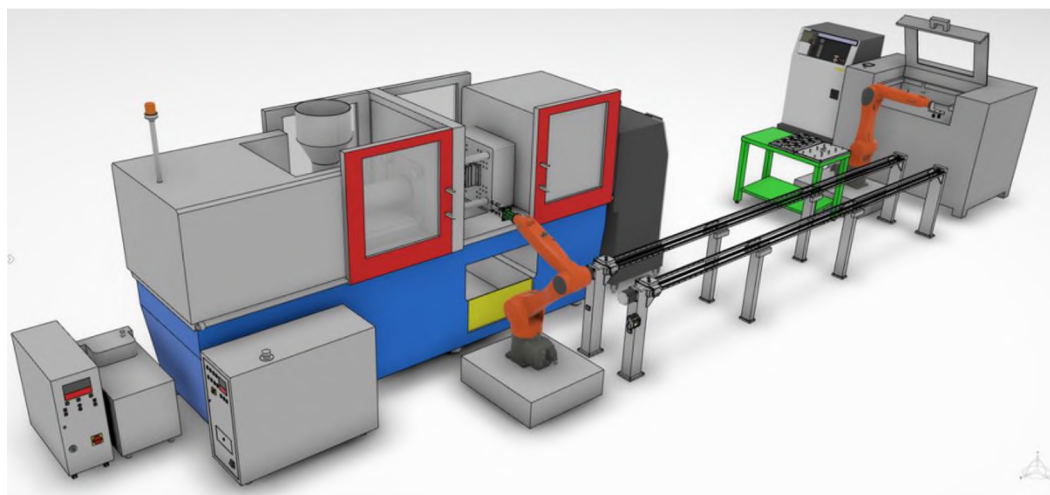


Рисунок 4. Имитационная модель производственной ячейки

Разработка имитационной модели уровня технологического процесса, которая включает как основные операции (связанные с изменением формы и свойств материала заготовки), так и вспомогательные (контроля, транспортирования и др.) позволяет отработать в виртуальной среде алгоритмы взаимодействия участвующих в рамках технологического процесса устройств, а также получить данные, необходимые для перехода к верхнему уровню имитационного моделирования - моделированию производственного процесса, который включает в себя управление поставками сырья, складами, человеческими ресурсами пр. Такая модель может быть использована для экономического анализа того или иного организационного решения отделами планирования производства и внутрипроизводственной логистики [8, 9].

Полученные при подготовке литейного производства 3D-модели, технологические процессы и результаты расчетов должны представлять собой единую модель данных, создаваемую в единой информационной среде. В основе модели данных 3D-модель изделия. Разработанная структура модели данных представлена на рисунке 5. Реализация данной модели в PDM-системе позволит всем специалистам, участвующим на разных этапах технологической подготовки литейного производства, получить доступ к актуальной информации и своевременно принимать необходимые организационно-технические решения.

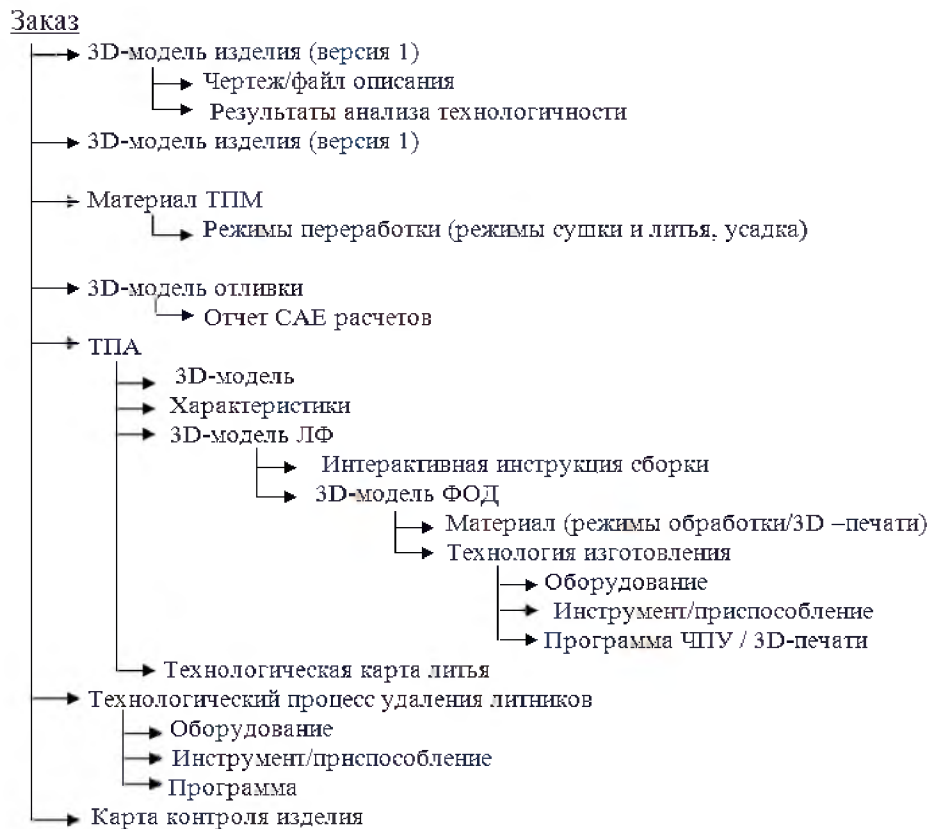


Рисунок 5. Структура информационной модели

### Выводы

Переход предприятий к цифровой подготовке производства позволит сократить стоимость и время за счет выявления ошибок в «виртуальном производстве», еще до перехода к реальному, но дальнейшие исследования должны вестись в направлении новой промышленной парадигмы – Индустрии 4.0 – концепции, совмещающей в себе умные фабрики, машины, системы, продукты и процессы в единой сети, объединяя физический и виртуальный мир [10]. «Умные фабрики» являются одной из ключевых особенностей этой новой парадигмы, являясь производственным решением, позволяющим выполнять гибкие и адаптивные процессы, которые подходят для быстрого удовлетворения потребностей рынка.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение методологии построения цифрового двойника – цифрового макета, полномасштабно описывающего объект производства, цифровые технологические процессы и саму производственную систему, позволяющего моделировать и оценивать процессы, происходящие в реальной производственной среде посредством сбора и анализа информации, поступающей с сенсоров и датчиков, установленных на технологическом оборудовании литейного участка. В целом эта работа представляет собой составляющую разрабатываемого авторами проекта цифрового производства, включающего также имитационные модели участков механической обработки и сборки.

### Список литературы

1. P.K.Paritala, S.Manchikatla, Prasad K.D.V. Yarlagaadda, “Digital Manufacturing - Applications Past, Current, and Future Trends”, *Procedia Engineering*, vol. 174, pp. 982-991, 2017.
2. A. Kutin, V.Dolgov, M.Sedykh, S.Ivashin, “Integration of Different Computer-aided Systems in Product Designing and Process Planning on Digital Manufacturing”, *Procedia CIRP*, vol. 67, pp. 476-481, 2018.



3. 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

4. Барвинский И.А., Пирогов А.В. Инженерные расчеты литья термопластов под давлением в Moldex3D R13 // *САПР и графика* -2014. - № 12. - С. 45-49

5. Куликов Д.Д., Носов С.О. Применение табличного процессора для решения технологических задач // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение* -2016. - Т. 59. - № 10. - С. 874-879

6. Бояринцев А.В., Дувидзон В.Г., Подсобляев Д.С. Быстрое изготовление пилотных серий деталей из термопластичных полимерных материалов.//*Полимерные материалы* №6, 2013.с. 4-9.

7. Яблочников Е.И., Пирогов А.В., Грибовский А.А. Совместное применение аддитивных технологий и систем виртуального моделирования при подготовке производства полимерных изделий // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение* -2014. - Т. 57. - № 5. - С. 72-76

8. Абаев Г.Е., Яблочников Е.И., Демкович Н.А. Роль и задачи имитационного моделирования на этапе перехода от цифрового производства к «умным фабрикам» // VIII всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2017). –2017. – С. 74

9. Natalia Demkovich, Eugeny Yablochnikov, Grigory Abaev, “Multiscale modeling and simulation for industrial cyber-physical systems”, 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS), pp. 291-296

10. M. Lopes Nunes, A.C. Pereira, A.C. Alves, “Smart products development approaches for Industry 4.0”, *Procedia Manufacturing*, vol. 13, pp. 1215–1222, - 2017