

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА: КИБЕРФИЗИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Ю.М. Кротюк¹, О.О. Кузнечик², В.В. Ткаченко¹

¹Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Минск

²Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа, Минск

INFORMATION SUPPORT FOR DESIGN AND TECHNOLOGICAL PREPARATION FOR ADDITIVE MANUFACTURING: CYBER-PHYSICAL APPROACH

Y.M. Krotiuk¹, O.O. Kuznechik², V.V. Tkachenko¹

¹United Institute of Informatics Problems of the NAS of Belarus, Minsk

²State Scientific Institution «Powder Metallurgy Institute», Minsk

Анализируется содержание процессов конструкторско-технологической подготовки аддитивного производства, требований к информационному обеспечению системы поддержки принятия и воплощения конструкторско-технологических решений. Выдвигается и рассматривается в парадигме киберфизических систем концепция формирования гибких интегрированных аддитивных производств в виде многоуровневых матричных кластеров, организованных с использованием инфраструктуры распределенных вычислительных сетей и принципов функционирования сетевых киберфизических информационно-управляющих систем.

Ключевые слова: аддитивное производство, конструкторско-технологическая подготовка, киберфизическая система, автоматизированное проектирование.

The content of the processes of design and technological preparation of additive manufacturing, the requirements for the information support system for the adoption and implementation of design and technological decision is analyzed. The concept of forming flexible integrated additive industries in the form of multi-level matrix clusters organized using the infrastructure of distributed computer networks and the principles of functioning of network-centric information and control systems is proposed and considered in the paradigm of cyber-physical systems.

Keywords: additive manufacturing, design and technological preparation, cyber-physical system, computer-aided design.

Введение

Аддитивное производство – это та сфера технических инноваций, которая наряду с робототехникой и другими информационными технологиями: искусственный интеллект и машинное обучение, облачные вычисления и большие данные, кибербезопасность и дополненная реальность, Интернет вещей и умная среда обитания («умное предприятие») рассматривается в концепции «Индустрии 4.0» как одна из составляющих промышленной революции, совершающейся в процессе внедрения киберфизических систем в производство товаров и продуктов и для обслуживания человеческих потребностей. Киберфизические системы (Cyber-Physical System, CPS) – это системы, состоящие из различных природных объектов, искусственных подсистем и управляющих контроллеров, позволяющих представить такое образование как единое целое [1]–[4]. В CPS обеспечивается тесная связь и координация между вычислительными и физическими ресурсами и это является в некоторых случаях источником упрощенного понимания киберфизической системы как «цифровой трансформации», в результате которой

компьютеры осуществляют мониторинг и управление физическими процессами с использованием такой петли обратной связи, где происходящее в физических системах оказывает влияние на вычисления и наоборот. На наш взгляд необходимо согласиться с мнением [3] о том, что представление о CPS не должно ограничиваться интеграцией технических средств, пусть даже с появлением нового качества – саморегулирования, самоконфигурирования и самооптимизации. CPS меняет способ взаимодействия людей с инженерными системами, так же как Интернет изменил способ взаимодействия людей с информацией, однако люди все равно остаются главными в этом процессе. Человек, таким образом, выполняет роль «управляющего звена» высшего уровня, контролирующего работу в автоматизированных и самоорганизующихся процессах. Для этих сложных систем требуется кибернетический подход к моделированию, поскольку именно модели являются центральным моментом в науке и инженерии. CPS помогут усилить аналитические способности человека, поэтому есть потребность в создании интерактивных систем нового уровня, сохраняющих человека в контуре управления.

С этих позиций авторами анализируются требования и рассматриваются функции, которые могут и должны быть реализованы в системе информационной поддержки конструкторско-технологической подготовки аддитивного производства (КТПАП). При этом используются базовые положения теории систем автоматизированного проектирования (САПР), разработанные в Объединенном институте проблем информатики Национальной академии Беларуси (ОИПИ НАН Беларуси, в то время – Институт технической кибернетики АН БССР), а система информационной поддержки КТПАП рассматривается как САПР, по определению включающая систему управления проектом, взаимосвязанные объекты проекта и программно-технические средства для использования этих объектов в процессе производства изделий [5], [6].

В настоящее время рынок программных продуктов предлагает ряд программных приложений и систем, которые наделены таким функционалом (например, Siemens PLM, PTC Pro/ENGINEER, IBM PLM CATIA). Лежащие в их основе форматы представления данных, численные методы и алгоритмы вычислений позволяют пользователю получать цифровые описания сложных деталей, сборочных единиц и агрегатов («цифровых двойников» проектируемых изделий), а также результаты моделирования физических процессов, влияющих на формирование необходимых свойств или характеристик объектов проектирования в процессе изготовления их и эксплуатации. Преодоление вычислительной трудоемкости задач моделирования, многовариантного анализа и оптимизации достигается применением технологий параллельных и распределенных вычислений, суперкомпьютерных конфигураций, позволяющих сократить затраты времени на проектирование и добиться наилучших качественных показателей для конечного изделия. Имеется также широкий выбор более доступных по цене программных приложений для построения САПР. Как правило, конструкторская часть их достаточно универсальна. Однако, в технологической части их функционал позволяет автоматизировать лишь немногие процессы технологической подготовки, в силу чего совместимость с системами управления жизненным циклом изделия или производственной деятельностью предприятия (ERP-CALS) требует отдельного рассмотрения.

Приложения, ориентированные на технологическую подготовку производства, находятся в стадии интенсивного наращивания своих возможностей, но в некоторой степени отстают от быстрого расширения ассортимента и возможностей оборудования 3D печати. Это обостряет вопросы, которые возникают в процессе внедрения интегрированных информационных комплексов КТПАП, требующих кастомизации и

настройки под конкретные процессы подготовки производства. Нередко этот процесс требует реализации отдельной, совершенно уникальной функциональности, помощи третьей стороны для интеграции приобретаемой системы с теми программами, которые уже установлены на предприятии, или для изменения того, что имеется в системе. Ситуация по вопросу освоения аддитивных технологий, которая складывается на большинстве некрупных предприятий машиностроительного профиля, рассчитывающих на создание новых производств и выпуск конкурентоспособной продукции, лишней раз подтверждает эти положения, в то время как возможности, связанные с этим освоением, являются определяющими условиями перехода к VI технологическому укладу.

1 Аддитивное производство как объект информационных технологий

Аддитивные технологии определяют то поле проектной деятельности, на котором смыкаются перспективные конструкторско-технологические решения задачи «сборки» цельной детали (узла) из микро- и наноразмерных частиц или слоев исходных материалов, а по сути – синтеза нового материала («композитного») или «метаматериала») [7], [8]. При этом концепция аддитивного производства означает размытие границ между уровнями инженерно-технического проектирования (новая концепция – новый материал – производство, как показано на рисунке 1.1), что приводит к необходимости создания особой среды информационного обеспечения (средств интеграции информационных ресурсов) и пересмотра критериев разделения труда проектировщиков.

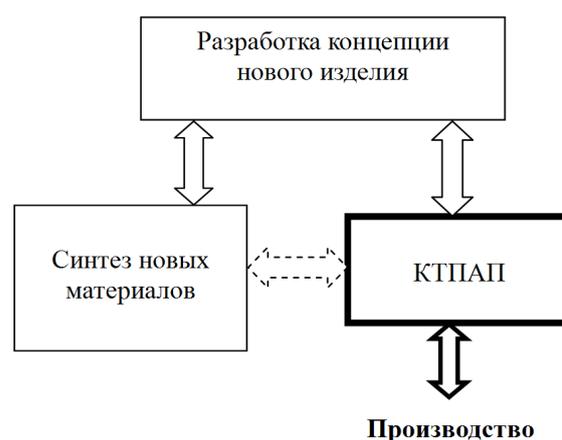


Рисунок 1.1 – Уровни инженерно-технического проектирования

Содержание конструкторско-технологической подготовки производства на различных предприятиях может существенно отличаться, так как зависит от многих составляющих и характера их деятельности: вида продукции, степени

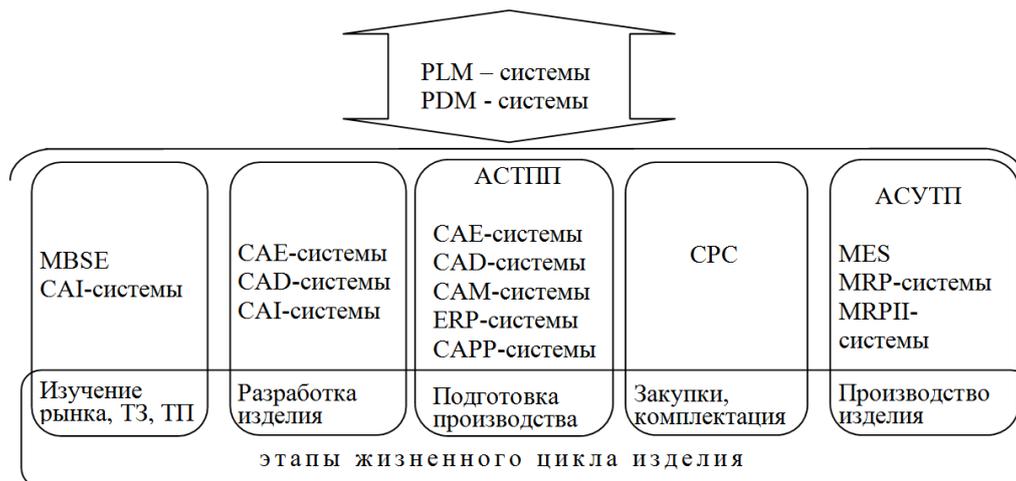


Рисунок 1.2 – Этапы конструкторско-технологической подготовки производства

унификации деталей и узлов, доступного оборудования, подготовки специалистов и другого, не исключаяющего конъюнктурную политику. В постановках и решениях частные задачи КТПАП могут быть разделены на организационные, производственные, дизайнерские, технологические, контрольно-испытательные, корректировочные и др., но в схеме на рисунке 1.1 они выделены общим блоком и показаны в разрезе уровней инженерно-технического проектирования, не учитывающих организационных и производственных вопросов.

Процессы конструкторского и технологического проектирования как неотъемлемые стадии продвижения любых новаций, в ходе развития вычислительной техники подверглись в наибольшей степени автоматизации благодаря относительно легкости алгоритмизации процессов инженерного расчета и перевода в цифровую форму конструкторско-технологической документации, используемой для управления программируемым оборудованием и создания информационно-поисковых систем с электронными базами данных. Это привело в свою очередь к созданию производственных комплексов с различной степенью интеграции систем информационного обеспечения КТПАП.

Безусловно, работы по внедрению интегрированных информационных комплексов КТПАП ведутся широким фронтом, но вопросы реального использования систем поддержки принятия решений на стадиях проектирования, относящихся к уровню концепции или уровню синтеза нового материала (материалов) с заданными характеристиками, в силу высокой стоимости таких систем рассматриваются в редких исключениях. Таким образом, несмотря на рост вычислительных мощностей и значимые достижения в области искусственного интеллекта, на практике концептуальное проектирование и выбор материалов из имеющейся номенклатуры, равно

синтез новых материалов и создание новых производственных технологий, остается прерогативой человека.

В проекции на «жизненный цикл» проектируемого изделия задачи, связанные с представлением объекта проектирования и показанные на рисунке 1.2, группируются следующим образом:

- изучение рынка, разработка технического предложения (ТП), технического задания (ТЗ). На этом этапе закладывается концепция будущего продукта, изделия. Он менее других этапов компьютеризирован в силу невозможности обойтись сегодня без привлечения интеллектуальных способностей человека. Именно этот этап проектирования определяет круг задач для «искусственного интеллекта» в том понимании этого термина, который его «ожидает» по мере раскрытия механизмов естественного интеллекта. Однако уже сейчас имеются программные продукты, ориентированные на поддержку решения изобретательских задач (Computer Aided Innovation, CAI) [9], [10], организации процессов концептуального проектирования, в основу которых положен междисциплинарный подход, получивший название модели-ориентированной системной инженерии (Model Based Systems Engineering, MBSE) [11];

- создание 3D моделей объекта (CAD-моделей) для работы с технологическим оборудованием аддитивного производства (3D печати), а также «цифрового двойника» для документирования, визуализации и взаимодействия специалистов в группе разработчиков. При этом необходимо иметь ввиду, что исходные данные с техническим заданием могут иметь различную глубину проработки и форму представления (прототип детали, эскизная документация, 3D модель);

- моделирование технологического процесса получения этого объекта для отработки режимов 3D печати, а также последующих

технологических операций упрочнения, механообработки и т. д., влияющих на получение заданных характеристик этого объекта (изделие как таковое), построения, определения и упрощения процесса с учетом поведения объекта в этих режимах;

– моделирование поведения «цифрового двойника» объекта с целью прогнозирования его функциональных свойств как готового изделия в условиях нагружения и эксплуатации, а также уточнения и корректировки первичных моделей.

Технологическая подготовка в аддитивном производстве включает следующие этапы:

– валидация геометрии модели – визуальная и алгоритмическая проверка целостности геометрического представления модели, обеспечение заданной технологической точности;

– компоновка рабочего стола или камеры – импорт моделей в заданном объеме и с заданной точностью, приведение единиц измерений, позиционирование моделей в системе координат печатающего устройства;

– проектирование оснастки / поддержек – выявление мест, требующих проектирования дополнительной оснастки или поддержки, обеспечение наполняемости внутренних объемов;

– проверка аппаратной совместимости – проверка компоновки моделей на технологические и температурные ограничения печатающего устройства;

– генерация управляющих программ – составление и проверка числовых программ оборудования.

За редким исключением получение готового изделия в аддитивном производстве не заканчивается «спеканием», «склеиванием», «сплавлением» частиц материала (порошкового, проволочного, пленочного). Требуется большой ассортимент основного и вспомогательного дорогостоящего оборудования: для подготовки (получения и хранения) исходных материалов, для контрольно-измерительных работ, для проведения дополнительных технологических операций (термообработки, механообработки, нанесения покрытий) с «заготовками» деталей, получаемых после 3D печати или стереолитографии. К такому оборудованию относятся различные печи, станки с числовым программным управлением, установки для упрочнения, поверхностной наплавки и др.

Установки для собственно 3D печати также отличаются большим разнообразием с учетом используемых материалов (металлических, керамических, полимерных) и процессов (селективного лазерного спекания, электронно-лучевого проплавления, фотолитографии, экструзии и др.). Технологические переходы и выбор между различными типами оборудования аддитивного производства могут осуществляться как в рамках одного производства, так и с привлечением контрагентов. Важным аспектом организации

аддитивного производства является то, что технологические операции, такие как 3D печать, отжиг, могут продолжаться сутками. Это порождает задачи составления расписаний технологических операций для загрузки оборудования, сложность решения которых «вручную» обусловлена разнородностью деталей в потоке заказов и многовариантностью построения технологических цепочек – возможно использование разного оборудования, решающего схожую задачу.

Реализация преимуществ аддитивного производства в таких условиях достигается только с применением информационных технологий последнего уровня и профессиональной готовностью специалистов к их использованию.

Даже на начальной стадии организации интегрированного в профильное предприятие элементарного аддитивного производства в качестве основного оборудования потребуются приобретение не только 3D-принтера, но и соответствующей вычислительной техники с программным обеспечением информационной поддержки КТПАП на базе программных приложений САПР (CAD/CAE/CAM) и организации внутренней локальной вычислительной сети с возможностями подключения интернета. Наличие по крайней мере одного рабочего места 3D-печати позволяет в условиях своего производства локализовать решение задач быстрого прототипирования перспективных образцов новой для предприятия продукции и минимизировать во многих случаях связанные с этим затраты. В пределах этого предприятия становление элементарного интегрированного аддитивного производства может осуществляться на базе такой административно-хозяйственной единицы, которая представляет собой, например, научно-производственную группу аддитивных технологий. В распоряжении такой группы может быть (рисунок 1.3) всего два автоматизированных рабочих места, каждое из которых имеет хотя бы одну станцию, объединенных одноуровневой локальной вычислительной сетью.

В дальнейшем, по мере перехода от быстрого прототипирования к созданию сначала экспериментальных образцов, а затем к выпуску опытных и установочных партий перспективной для профильного предприятия продукции, группа аддитивных технологий может последовательно преобразовываться в лабораторию, сектор, отдел и т. д., которые включают в себя группы или лаборатории с функциями САПР, а также производственные участки подготовки и осуществления 3D-печати. Для эффективного управления этим процессом в рамках интегрируемого аддитивного производства потребуются наращивание требований к информационно-коммуникационным связям и количеству уровней организации вычислительной сети. (Такое интегрированное аддитивное производство будет уже не элементарным).



Рисунок 1.3 – Структурная схема организуемого на базе группы аддитивных технологий элементарного интегрируемого аддитивного производства



Рисунок 1.4 – Схема последовательности решения типовых задач КТПАП при внедрении в аддитивное производство вновь разрабатываемой продукции

Для поддержания требуемой производительности и надежности работы, а также минимизации простоев из-за ремонта или модернизации основного оборудования, включая устранение неполадок или обновление программного обеспечения, ответственный персонал интегрированного аддитивного производства вынужден, пользуясь интернетом, через многоуровневые районные и региональные локальные вычислительные сети обращаться к представителям либо производителя этого оборудования, либо сервисными центрами по его ремонту и обслуживанию, либо к представителю разработчика или распространителя программного обеспечения к этому оборудованию. Эти обращения связаны

с необходимостью представления им удаленного доступа и решения в режиме реального времени типовых задач:

- передача и обсуждение, в том числе и с помощью вебинара, получаемой от заказчика или разработчика 3D-модели изделия для его выпуска на профильном предприятии;
- обсуждение с представителями других аддитивных производств, использующих типовую аддитивную технологию 3D-печати или аналогичный исходный материал, в том числе и с помощью вебинара, общих технологических проблем, включая обслуживание и дистанционное управление однотипными 3D-принтерами.

Кроме вышеуказанных, при переходе к выпуску нового вида продукции ответственный персонал интегрируемого аддитивного производства может обращаться к представителям профильных научно-практических центров для решения типовых конструкторско-технологических задач (рисунок 1.4) с использованием САПР.

Ответственный персонал элементарного интегрируемого аддитивного производства также может пытаться решать и самостоятельно типовые задачи КТПАП с использованием САПР. В этом случае для снижения вероятности ошибок и сокращения времени на получение желаемого решения он будет вынужден через многоуровневые районные и региональные локальные вычислительные сети обращаться к представителям научно-практических центров развития информационных технологий для предоставления на определенное время специализированных программ и дополнительных вычислительных ресурсов с целью расширения возможностей имеющихся в его распоряжении средств информационной поддержки КТПАП.

2 Программные инструменты информационной поддержки КТПАП

Центральное место в информационно-вычислительной системе автоматизированного проектирования занимают базовые программные компоненты, приведенные на схеме рисунка 1.2. Ниже дана их краткая характеристика, которая никак не может претендовать на полноту охвата, но позволяет рассматривать направления использования применительно к аддитивным технологиям.

По функциональной полноте существующие САПР для общемашиностроительного проектирования разделяются условно на три уровня. К верхнему уровню относятся программные системы коллективного пользования сквозного проектирования и производства (тяжелые САПР). На сегодняшний день к ним относятся CATIA (Dassault Systemes); UNIGRAPHICS NX (Siemens PLM Software) и Pro/ENGINEER(PTC).

На среднем уровне располагаются программные комплексы, которые позволяют создавать трехмерные параметрические модели сравнительно несложного изделия методом твердотельного моделирования, выполнять проверочные расчеты деталей и сборок: Solid Works (SolidWorks Corp., США), AutoCAD Inventor и Autodesk Mechanical Desktop (AutoDesk, США), Solid Edge (Siemens PLM Software, Германия), T-FLEX (Топ Системы, Россия), КОМПАС-3D (Аскон, Россия) и др. Эти САПР относятся к категории индивидуального пользования.

К нижнему уровню (легкие САПР) могут быть отнесены программы для автоматизации разработки и сопровождения технической документации (чертежей и спецификаций, технологических карт, ведомостей). Например: AutoCADLT

(AutoDesk), T-Flex CAD 2D (Топ Системы), КОМПАС-График (Аскон), CADMECH (Интермех). САМ-системы, предназначенные для подготовки управляющих программ оборудования с числовым программным управлением, могут быть в виде автономных программ или интегрированных с другими программными приложениями, поддерживающими широкий список импортируемых форматов 2D и 3D геометрической информации: как проприетарных (SolidWorks, Parasolid, DWG, NX и других) при наличии соответствующих трансляторов, так и открытых (STEP, IGES) форматов.

Типовая структура автоматизированной системы технологической подготовки производства (АСТПП) включает:

- информационно-поисковую подсистему, являющуюся базой данных для работы остальных подсистем;

- подсистему автоматизированного проектирования технологического оснащения, предназначенную для разработки конструкции ступеней, штампов, кондукторов, прессформ, спецфрез и т. д.;

- подсистему автоматизированного расчета управляющих программ для оборудования с числовым программным управлением, применяемого при изготовлении как технологического оснащения, так и элементов конструкции изделий;

- подсистему автоматизированного проектирования технологических процессов для разработки маршрутных технологий, операционных технологий, оформления карт, ведомостей и другой технологической документации.

Примерами АСТПП являются ADEM (Группа компаний ADEM), T-Flex Технология (Топ Системы), Компас Вертикаль (Аскон). Среди примеров программ, ориентированных на применение в аддитивном производстве, необходимо указать ATSS (Национальный исследовательский университет МАИ, Россия), Digimat (eXstream engineering), Additive Manufacturing (ESI Group), Simufact Additive (MSC&Software Company). Последние два примера – логичное расширение линейки программных продуктов этих же компаний от задач моделирования сварочных процессов и термической обработки к аддитивным технологиям.

Применение CAD/CAM-систем тесно связано с системами инженерного анализа (CAE). Основой CAE-систем являются различные численные методы расчетов: метод конечных элементов, метод конечных разностей, метод конечных объемов. Используя инструменты CAE-приложений, инженер может оценить работоспособность будущего изделия, не прибегая к значительным временным и денежным затратам на изготовление и испытания экспериментальных образцов. В системах полнофункционального инженерного анализа, обладающих мощными средствами,

большими хранилищами типов для сеток конечных элементов, а также всевозможных физических процессов предусмотрены собственные средства моделирования геометрии. Кроме того, есть возможность импорта через промышленные стандарты Parasolid, ACIS. Самыми известными среди подобных систем считаются ANSYS, LS DYNA, AI*NASTRAN и MSC.NASTRAN, ADAMS, Marc.

Средства инженерного анализа, которые включены в тяжелые САПР, имеют возможно менее мощный функционал, но благодаря единству описания геометрии позволяют сразу отслеживать изменения модели. Расчетные данные структурированы и интегрированы в общую систему проектирования САПР. В отдельных случаях CAE-систем, оперирующих с данными в собственных форматах, используется встроенный инструментариий САД-системы, в других – обеспечивается считывание геометрических описаний в обменных форматах из САД-приложений.

Для максимально полного использования возможностей аддитивных технологий ведущие разработчики САПР-приложений предлагают пользователю программные продукты с функциями топологической оптимизации, под которой понимается процесс изменения конструктивных элементов с целью снижения массогабаритных характеристик и улучшения функциональных особенностей без снижения прочности и долговечности изделия. Такие возможности открываются для специалистов, готовых к применению новых подходов к проектированию деталей – бионического дизайна – практически со всеми упомянутыми выше программами [12], [13].

В общем случае инструментариий современных CAE-систем позволяет решать те или иные проектные задачи, в т. ч. связанные с моделированием процессов 3D печати. (Для этого разработчиками CAE-систем предлагаются специальные приложения как надстройки или программные оболочки для базового комплекса). Однако применение их требует очень высокой квалификации проектировщика и не только большого опыта его работы с САД/CAE-приложением, но и знания особенностей используемого процесса 3D печати, свойств материала и характеристик конкретного оборудования. Как правило, производитель предоставляет свое оборудование, комплектуя его технологическим программным обеспечением, рассчитанным на применение определенного материала или его ограниченной номенклатуры. Особенности же используемого процесса обработки материала остаются для потребителя скрытыми, что усложняет выбор параметров рабочего режима 3D печати.

Действующими стандартами аддитивного производства определены выходные форматы файлов описания рабочих 3D моделей (STL, VRML, WRL, IGES, AMF, X3D), а программное

обеспечение нижнего уровня, как правило, ориентировано на систему команд G-code, широко применяемую в автоматизированном производстве и поддерживаемую в САМ-приложениях. В то же время формат данных управляющих программ может зависеть от модели 3D принтера и функционала его встроенных программно-аппаратных средств.

Оценивая возможности использования рассмотренных программных продуктов с позиции потребителя, перед которым стоит задача создания цифрового двойника изделия и получения образца такого изделия с требуемыми характеристиками за минимальное количество итераций, можно говорить о проблемах, с которыми он сталкивается на пути внедрения аддитивных технологий.

Основными недостатками доступного для большинства небольших предприятий и проектных организаций общемашиностроительного профиля программного обеспечения КТПАП являются:

- отсутствие достаточного объема сведений об алгоритмах и методиках расчета, необходимых для инженерного обоснованного и осознанного их применения;

- ограничения базы данных по номенклатуре материалов, оборудования или связям с нормативными документами, используемыми на предприятии, что усложняет выбор проектных решений, другие программные ограничения по точности расчета и функциональности;

- отсутствие гарантированной технической и пользовательской поддержки и возможности оперативных доработок, непрозрачный механизм ценообразования под частные задачи пользователя или новые производства;

- невозможность расширения функциональности силами пользователя для проведения специальных инженерных расчетов, в том числе связанных с модернизацией или применением специализированного технологического оборудования 3D печати.

Применение современных методов и средств проектирования изделий на предприятиях связано с необходимостью согласования технологических схем проектирования с методологиями проектирования и инженерного анализа, реализованными в составе используемых программных продуктов. Специфика работы многих отечественных проектных организаций общемашиностроительного профиля заключается в вынужденном использовании нескольких САД-систем, а также пакетов математического моделирования и программных инструментов для проведения инженерных расчетов и исследований. Отсутствие единой среды разработки приводит к разнообразию методологий проектирования и настроек рабочей среды, формирующих индивидуальный стиль, которое мешает групповой работе.

Очевидно, что необходимо наличие программных решений, которые обеспечили бы возможность построения интегрированных сред проектирования самими проектировщиками с учетом специфики решаемых ими задач, возможность их развития и адаптации при проектировании сложных технических объектов.

С этой целью в ОИПИ НАН Беларуси проводились исследования по формированию интегрированной среды информационной поддержки процессов проектирования и инженерного анализа конструкций сложных технических объектов (ИСППИА) [14]. Такая среда предназначена для обеспечения совместного функционирования приложений от различных разработчиков и настройки ее инструментов и конфигурации согласно нуждам предприятия. Процесс проектирования и инженерного анализа конструкции осуществляется в рамках единого графического интерфейса и на основе единой базы данных, доступных для графического моделирования с пакетами инженерного анализа и специализированными приложениями для расчетов и оптимизации параметров элементов конструкции и конструкции в целом.

Условием успешности реализации процесса КТПАП является следование основным принципам создания автоматизированных информационных систем:

– *принципа системного единства*. Все элементы комплексной системы являются частями единого целого, где функционирование отдельных блоков подчинено общей цели – созданию изделий с заданными свойствами и характеристиками;

– *принципа модульности*. Модульная структура позволяет добиться их относительной независимости модулей в процессе функционирования и минимизирует затраты, связанные с изменениями в процессе сопровождения;

– *принципа открытости*. Система может быть расширена за счет добавления в нее новых элементов по мере развития технологий;

– *принципа эргономичности*. Модульная структура обеспечивает удобство и правильное разделение функций между пользователями (конструкторами, технологами), участвующими в процессе.

Дополнительно можно отметить принцип применения групповой технологии. Применение групповой технологии подразумевает классификацию деталей в группы, представляющие собой совокупность объектов, подобных друг другу по геометрической форме, размерам и технологическим процессам их изготовления. Отнесение детали к существующей группе на основе ее формы и размеров позволяет быстро найти в технологической базе данных предприятия последовательность процессов, используемых для изготовления похожих деталей и модифицировать ее для изготовления новой детали.

По результатам НИР, выполненной в рамках государственной научно-технической программы и программы научных исследований, на основе совокупности математических и инструментальных средств (в том числе, на базе отраслевых суперкомпьютерных конфигураций) создан экспериментальный образец такой системы ИСППИА:

– объединены в рамках единого графического интерфейса и на основе единой базы данных инструментальные программные средства построения интегрированной среды: среда графического моделирования, пакеты инженерного анализа и специализированные приложения, используемые в заданной предметной области для реализации процедур расчетов и оптимизации параметров элементов конструкции и конструкции в целом;

– разработаны алгоритмы функционирования ИСППИА в режиме клиент-серверного приложения;

– проведено тестирование экспериментального образца среды на реальной информации о проектируемых объектах.

Архитектура ИСППИА отвечает перечисленным выше принципам построения автоматизированных информационных систем. Для сборки компонентов и обеспечения их совместного функционирования используется программа, именуемая платформой распределенных компонентов. Эти средства, будучи апробированы при создании САПР инструментов поперечно-клиновой прокатки, успешно использовались при создании интегрированной среды проектирования и инженерного анализа машиностроительных конструкций для агротехники и могут служить базой для создания эффективной специализированной системы компьютеризации инженерного труда для решения конструкторско-технологических задач аддитивного производства.

3 Формирование гибкого матричного кластера в условиях развития интегрируемого аддитивного производства

Одним из решающих обстоятельств является то, что подготовка и выполнение конструкторских и технологических операций в аддитивном производстве должны осуществляться в тесном взаимодействии специалистов с разных рабочих мест. Оперативная взаимосвязь их может быть организована только с применением сетевых технологий. В задании на построение такой сети необходимо принять во внимание, что в ней целесообразно выделить несколько (виртуальных) подсетей, ориентированных на решение отдельных задач:

– сеть для специалистов, решающих конструкторско-технологические задачи;

– сеть обеспечения технологического процесса;

– сеть сервисного обслуживания и ремонта. Характеристики компьютерной сети должны обеспечивать оперативное взаимодействие территориально разнесенных пользователей с учетом неравномерности ее загрузки. Набор программных приложений, определяемый перечнем задач КТПАП, целесообразно дополнить специализированным приложением-путеводителем, содержащим справочные сведения по кадровому составу и компетенциям специалистов, которая выполняла бы роль агрегатора рабочих мест в пределах каждой из подсетей для быстрого выполнения задач или решения возникающих при этом проблем.

Важнейшее требование при организации корпоративной сети – сделать максимально эффективной, эргономичной и защищенной работу предприятия или организации. Нередки ситуации, когда усилия, затраченные на организацию внутренней сети, сопровождаются издержками из-за неправильного подхода к реализации потенциальных преимуществ использования корпоративной сети, а именно: повышения производительности труда за счет грамотной организации параллельных вычислительных процессов, чего невозможно достичь при наличии мощных, но автономных вычислительных устройств; устойчивости к сбоям и отказам отдельных элементов, объединенных в единой системе, за счет дублирования данных на различные типы сетевых носителей и переключения запросов и процессов на работоспособные сегменты внутренней сети.

Выполнение одновременно большого количества различных задач, имеющих целью общий результат, существенно ускоряется, когда между различными структурами и подразделениями организации налажена бесперебойная коммуникация. При этом проще осуществлять контроль коммерческой и технической безопасности, защиту важных корпоративных данных, имея доступ ко всем программным и аппаратным элементам и периферийным устройствам одновременно.

Принимая во внимание разветвленность, производительность и иерархичность у имеющихся и создаваемых многоуровневых вычисли-

тельных сетей, которые привели к появлению облачных технологий, следует полагать, что необходимость решения указанных выше типовых информационно-технологических задач для элементарных интегрируемых аддитивных производств при увеличении их количества, с последующим переходом в многоуровневые гибкие аддитивные производства, неизбежно приведет к появлению, пусть даже и на ограниченное время, двух и более гибких матричных кластеров (рисунок 3.1). Один из них будет охватывать информационно-технологические задачи виртуального моделирования и прогнозирования, а другой – перепрограммирование, диагностику и настройку (калибровку) 3D-принтеров, включая контроль за режимами 3D-печати и устранение возникающих при этом аварийных ситуаций. Отметим, что увеличение количества элементарных (одноуровневых) с последующим возможным их преобразованием в более сложные (многоуровневые) интегрируемые аддитивные производства будут только поддерживать развитие этих гибких матричных кластеров.

Пример организации ячейки элементарного гибкого матричного кластера на базе локальной компьютерной сети приведен на рисунке 3.2. Для практической ее реализации выбрана и апробирована сетевая архитектура, обеспечивающая локализацию обмена данными и надежную их передачу между территориально разнесенными рабочими местами на технологических участках аддитивного производства Института порошковой металлургии имени академика О.В. Романа и высокопроизводительными вычислительными комплексами Республиканского суперкомпьютерного центра ОИПИ НАН Беларуси.

Гибкость кластерных решений для интегрируемого аддитивного производства состоит в создании новых возможностей и способов выполнения прикладных задач, в том числе, в возможности, при необходимости, подключения их вычислительных ресурсов и облачных технологий для решения той или иной возникшей проблемы на каком-либо другом гибком аддитивном производстве, условно выступающим в качестве

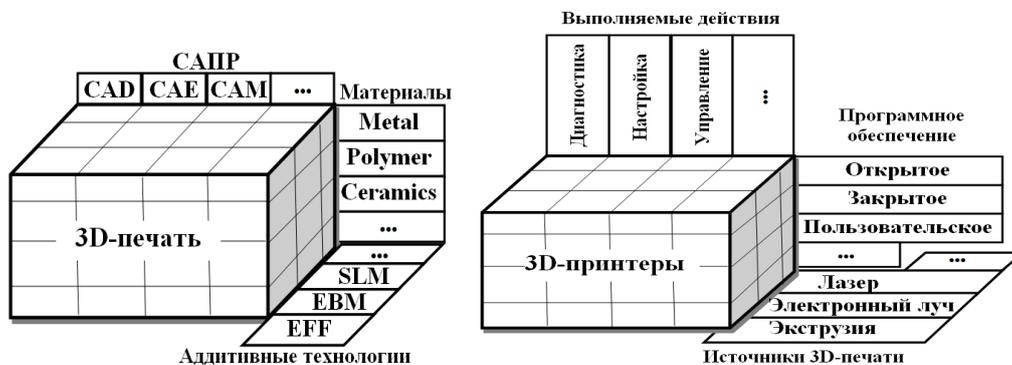


Рисунок 3.1 – Матричная структура формирования гибких кластеров интегрируемых аддитивных производств

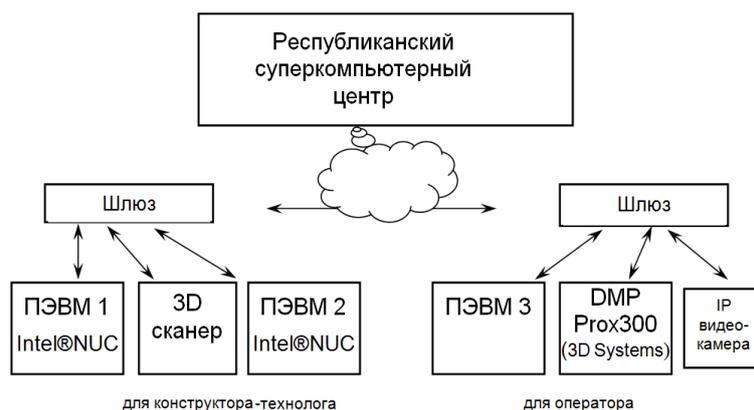


Рисунок 3.2 – Блок-схема ячейки элементарного гибкого матричного кластера

абонента. В таком представлении ситуации указанные кластеры следует рассматривать в сетевцентрической парадигме матричных информационно-управляющих систем (ИУС) [15].

Основой матричной архитектуры является решетка (грид-архитектура), в которой осуществляется как вертикальная связь между источниками информации, узлами принятия решений и исполнительными органами, так и горизонтальная интеграция между поставщиками, обработчиками и пользователями информации, работающими во взаимодействии с распределенным «многоядерным процессором» по предоставленному абонентом удаленному доступу. Особенностью такого «процессора» будет являться то, что в качестве одного из его ядер могут выступать вычислительные ресурсы входящего в гибкий матричный кластер какого-либо участка аддитивного производства.

Преимущества сетевцентрического управления реализуются при:

- наличии общих целей предприятия и отсутствии четкого планирования для нижестоящих уровней управления;
- взаимодействии и параллельности работы руководителей различного уровня и различных подразделений или лиц, принимающих решения, не имеющих четкой структуры подчиненности;
- координации деятельности руководителей и объектов управления с использованием возможностей глобальных информационных сетей;
- согласовании индивидуальных решений подсистем, каждая из которых работает на свою цель и выполняет свои задачи;
- самоорганизации системы за счет хорошо налаженного обмена информацией между ее компонентами и способности к быстрой их реорганизации в случае необходимости.

Сетевцентрические ИУС благодаря мерам, предусматривающим их устойчивость к частичным отказам каналов связи, высокий уровень защиты от несанкционированного доступа, перекрестный анализ данных, повышающий их достоверность, обеспечивают полноценный доступ к

информации, необходимой для вовлеченности каждого звена системы и понимания каждым общей стратегии и тактики, чтобы оперативно делегировать существенную часть полномочий по принятию решений нижним звеньям иерархической системы управления, вплоть до исполнителей, которые являются объектами управления.

Важное место в решении этих задач, помимо согласования программных интерфейсов (API), отводится организации человеко-машинных интерфейсов, рассчитанных на разный уровень подготовки и специализацию участников, а также использованию элементов «искусственного интеллекта». Последнее согласуется с парадигмой киберфизических систем и означает, что заказы на выпуск изделий выполняются не по готовым или известным конструкторско-технологическим решениям, а по результатам проектирования «с нуля», то есть подготовки технического задания с привлечением моделей MBSE, инструментов извлечения и формирования «знаний» о физико-химических процессах и оборудовании аддитивных технологий, в том числе с использованием самой последней информации, доступной из глобальной сети интернет. Актуализация знаний в предметной области является важной конкурентной и прогностической составляющей в принятии проектных решений.

4 Интегрированная среда информационной поддержки конструкторско-технологической подготовки аддитивного производства

Интегрированная система информационной поддержки процессов КТПАП представляет собой операционную среду (рисунок 4.1) с набором инструментальных средств (программных компонентов) для компьютеризации инженерной деятельности и позволяет реализовать ряд функциональных задач, возникающих при конструкторско-технологическом проектировании:

- создания и ведения базы нормативных данных;
- управления процессом выполнения проектных процедур;

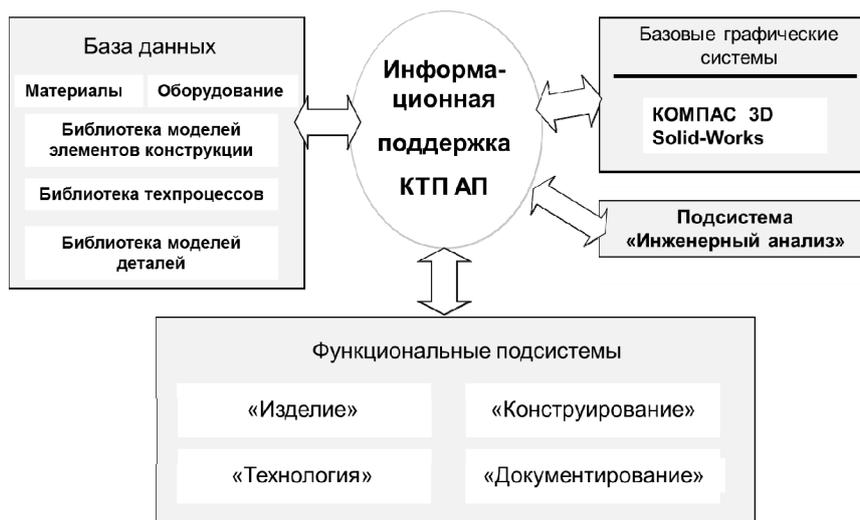


Рисунок 4.1 – Компоненты системы информационной поддержки КТПАП

- ведения библиотеки моделей элементов конструкции, типовых узлов, и проектов-аналогов;
- поддержки процессов формирования конструкции из типовых элементов;
- поддержки процессов расчета параметров элементов конструкции;
- поддержки процессов расчета параметров конструкции;
- поддержки процессов подготовки данных для инженерного анализа элементов и узлов конструкции;
- поддержки процессов формирования и документирования результатов инженерного анализа конструкции;
- автоматизации процесса формирования спецификаций конструкции;
- поддержки процесса формирования технологической документации.

Основными принципами создания ИСПИА являются:

- информационная и техническая совместимость средств, используемых в составе ПО;
- унификация, типизация и стандартизация средств и подсистем;
- максимально возможная инвариантность к проектируемым объектам и отраслевой специфике;
- возможность развития используемых библиотек элементов конструкции конструктором в процессе эксплуатации;
- модульная структура ПО.

Управление всеми процессами информационного обмена обеспечивает программа-менеджер из состава комплекса, в т. ч.:

- информационную поддержку процессов описания и подготовки данных для проектирования элементов конструкции;
- хранение нормативных данных и библиотек параметризованных 3D моделей элементов конструкции и сборочных узлов;

- совместное функционирование программных приложений и взаимодействие между функциональными подсистемами в процессе реализации проектных процедур, предоставление информации автоматизированным системам, задействованным в процессе проектирования;
- реализацию расчетных процедур, генерацию отчетов.

Основой реализации проектных процедур является метод декомпозиции – разбиения проектируемого изделия на составные элементы (детали) и группы элементов (сборочные единицы) и дальнейшего проектирования элементов изделия для выделенных элементов (групп элементов) с последующим решением задачи сборки изделия из элементов и групп.

Для обеспечения поддержки процессов инженерного анализа конструкций и выполнения прочностных расчетов используются программные средства расчета элементов конструкций, программные средства расчета конструкций и программные средства подготовки расчетных данных для пакета LS-DYNA. Данные программные средства обеспечивают интеграцию инженерных пакетов ANSYS и LS-DYNA с базовой системой геометрического моделирования и позволяют проводить численное моделирование конструкций в различных постановках (одномерный или трехмерный случай на базе конечных элементов типа BEAM, трехмерный случай на базе конечных элементов типа SOLID).

Взаимодействие пользователя с системой осуществляется посредством графического интерфейса, обеспечивающего наглядное, интуитивно понятное представление структуры размещенной в системе информации, быстрый и логичный переход к базовым и дополнительным функциям.

Следует иметь в виду, что используемые компоненты можно также модифицировать

независимо друг от друга для наращивания функций, но при этом необходимо учитывать общие требования, предъявляемые к их структуре и форме взаимодействия друг с другом.

Структура комплекса допускает расширение, совершенствование и обновление средств автоматизации проектирования без изменения основной части комплекса. При этом важным аспектом является возможность совершенствования и адаптации к условиям конкретного производства самими пользователями (соответствующими подразделениями предприятия-потребителя).

Такая возможность базируется на применении в системе доступных с точки зрения потребителя программных сред, применении легко корректируемых потребителем БД и использовании в процессе создания программных средств унифицированных решений по структуризации объекта проектирования и интерфейсам пользователя в процессе работы с этими структурами.

Комплексирование средств компьютерной графики и геометрического моделирования по предложенной схеме позволяет охватить этапы конструкторско-технологического проектирования сложных технических объектов, изготовление которых связано с выбором различных цепочек и режимов технологических операций с использованием импульсно-плазменной и импульсной селективной лазерной обработки материалов-геттеров, и автоматизировать выполнение перечисленных ниже функций:

- создания и ведения базы данных, обеспечивающей хранение библиотечных сборочных моделей конструктивных элементов и моделей элементов конструкции, а также шаблонов их чертежей, хранение параметров проектов конструкций и файлов моделей этих проектов;
- создания нового проекта или открытия существующего, закрытия и сохранения проекта;
- редактирования текущего проекта путем добавления, замены, удаления элементов конструкции с применением специальных форм;
- редактирования элементов конструкции проекта путем ввода, замены, удаления значений параметров с применением специальных табличных форм;
- редактирования рабочей базы данных проекта;
- выполнения задачи расчета параметров геометрических моделей проектируемых элементов конструкции;
- справочной поддержки конструктора в процессе работы;
- взаимодействия со средой геометрического моделирования конструкций: открытие, переключение моделей элементов конструкции, создание сборочных конструкций;
- автоматизации и информационной поддержки процессов расчета параметров элементов конструкции;

– поддержки процессов оптимизации параметров конструкции, которая осуществляется путем вариации параметров формы, размеров и свойств конструкции;

- выявления мест, требующих проектирования дополнительной оснастки или поддержки;
- проверки компоновки моделей на технологические температурные ограничения печатающего устройства;
- составление и проверки числовых программ печатающего оборудования;
- поддержки процессов инженерного анализа элементов (включая подготовку данных для расчета напряженно-деформированного состояния конструкции, проведение прочностных расчетов балочных элементов и объемного изделия);
- удаленной поддержки процессов инженерного анализа унифицированных элементов для сложных задач с использованием вычислительных мощностей высокопроизводительной мультипроцессорной вычислительной системы класса «СКИФ К-1000»;
- поддержки процессов выпуска конструкторской документации (чертежи, спецификации) по результатам проектирования;
- предоставления информации автоматизированным системам, задействованным в процессе проектирования.

Автоматизация соответствующих проектных функций в рассматриваемой технологии реализуется набором компонент – библиотекой, базовыми компонентами которой могут служить образцы инструментальных программных средств, разработанные в ОИПИ НАН Беларуси. Для сборки компонент и обеспечения их совместного функционирования используется программа, именуемая платформой распределенных компонент.

Совместимость конструкторской, расчетной и технологической моделей при организации взаимодействия между системами CAE/CAM в интегрированной среде позволяет охватывать полный цикл подготовки аддитивного производства, включая функции компоновки рабочей камеры оборудования, генерацию послойного представления модели с дополнительными поддерживающими элементами будущей детали и составления управляющих команд в форматах данных для используемого оборудования.

Базовые функции дополняются также программно-алгоритмическими средствами, в которых учитывается специфика процесса 3D печати для металлургических принтеров с использованием высокомошных концентрированных потоков энергии. Среди программ, позволяющих решать задачи анализа термо-нагруженного состояния, прогнозирования напряжений, расчета прочности и деформаций изделий из металлических порошков, необходимо выделить ESI Additive Manufacturing и Simufact Additive. Эти

программы представляют собой интегрированные вычислительные платформы для моделирования процесса послойного наращивания детали из металлических частиц. В частности, средствами Simufact Additive поддерживается моделирование технологического процесса спекания частиц порошка с учетом всех его физических характеристик, включая процессы селективного лазерного плавления (Selective Laser Melting, SLM), прямого лазерного спекания металлов (Direct Metal Laser Sintering DMLS), селективного лазерного плавления металлических порошковых материалов (LaserCUSING), электронно-лучевого плавления (Electron Beam Melting, EBM). При этом Simufact Additive поддерживает импорт высокоточных моделей большой размерности для деталей вместе с поддерживающими элементами из практически любой CAD системы с различными форматами файлов: IGES, STL, STEP, Catia V4/V5/V6, Unigraphics, SolidWorks, ACIS, Autodesk Inventor, Parasolid и дает возможность:

- вычислить деформации детали и уменьшить или вообще избежать искажения ее формы;
- выбрать оптимальное направление печати;

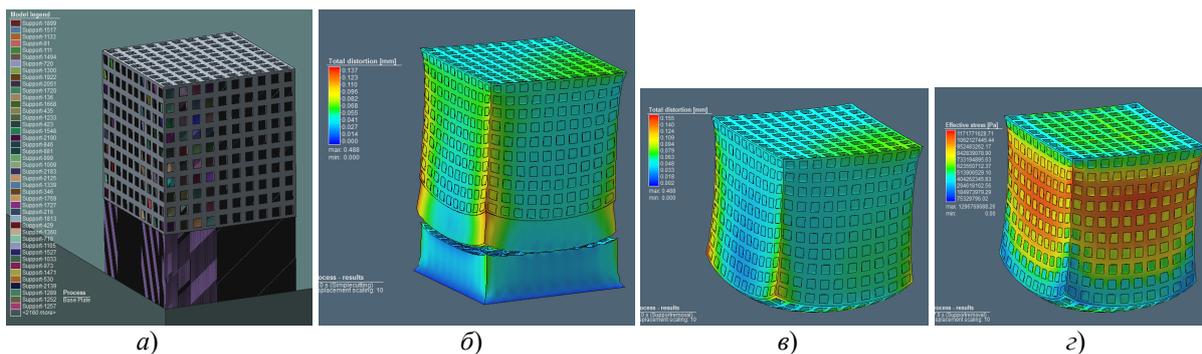
– оптимизировать поддерживающую структуру;

– получить состояние детали после термической обработки, удаления опорной пластины и поддерживающих элементов;

– минимизировать остаточные напряжения;

– уменьшить затраты материалов и энергии в процессе производства.

В результате расчета вычисляются коробление в детали, напряжения, визуализируется ее деформация с любым масштабным множителем. Следующим шагом является корректировка исходной модели путем внесения в ее геометрию рассчитанных деформации с обратным знаком. Экспорт описания детали с деформированной геометрией позволяет подобрать такую исходную форму детали, которая после процесса печати даёт минимальное отклонение от требуемой, компенсируя коробление, возникающее при создании этой детали. Результаты моделирования средствами Simufact Additive на примере ячеистой детали из металлического порошка, подготовленной нами в качестве прототипа материала-геттера, приведены на рисунке 4.2.



а) исходная модель с основанием и подержками;
 б) общая деформация после удаления основания;
 в), г) – общая деформация и внутренние напряжения после удаления подержек (деформации детали относительно габаритных размеров показаны в масштабе 10:1)

Рисунок 4.2 – Моделирование детали с ячеистой структурой

Важным является также то, что технология Simufact Additive встраивается в общую линейку программного обеспечения MSC Software, в частности, комбинируется с топологической оптимизацией, которую можно моделировать в программной среде MSC Nastran. Таким образом, можно спроектировать деталь ажурной формы, которая обеспечит эффективное использование материала, и промоделировать процесс послойного изготовления такой детали согласно особенностям той технологии нанесения материала, которой соответствует выбранный тип оборудования 3D печати.

Заключение

Проведенный анализ конструкторско-технологических задач, решаемых в процессе подготовки производства изделий с использованием

аддитивных технологий, позволил определить базовый состав функций, выполнение которых должно быть автоматизировано в системе информационной поддержки КТПАП, а также направление развития гибких интегрированных аддитивных производств, учитывающее возможности внедрения информационно-управляющих систем на основе матричной архитектуры и расширения круга предприятий, осваивающих аддитивное производство.

Предложена концепция формирования гибких интегрированных аддитивных производств в виде многоуровневых матричных кластеров, организованных с использованием распределенных вычислительных сетей и принципов функционирования сетевых информационных управляющих систем, предоставляющих возможности использования готовой инфраструктуры

поддержки распределенных вычислений (грид-сети), средств обеспечения защиты данных и информационной безопасности кластерных решений аддитивного производства.

Показана необходимость создания особой, опирающейся на парадигму киберфизических систем, среды информационного обеспечения процессов КТПАП, что обусловлено синергией условий решения конструкторских и технологических задач, быстрым накоплением новых знаний в сфере аддитивных технологий и уточнением в связи с этим моделей управления процессом проектирования. Определены компоненты и структура интегрированной среды информационной поддержки процессов КТПАП в разрезе этапов жизненного цикла изделия и с учетом результатов апробации программных приложений с применением высокопроизводительных вычислительных систем, на которых продемонстрированы возможности использования ранее разработанных инструментальных средств интегрированной среды информационной поддержки процессов проектирования и инженерного анализа конструкций сложных технических объектов, а также заимствованных программ для анализа «поведения» детали, получаемой по аддитивной технологии из металлического порошка, на примере моделирования ее «цифрового двойника».

ЛИТЕРАТУРА

1. Дробот, В.С. Перспективы развития киберфизических систем / В.С. Дробот // Control Engineering Россия. – 2018. – № 5 (77). – С. 30–31.
2. Manganello, K. Will Industry 5.0 Really Be Revolutionary? / К. Manganello // II Tomas [Электронный ресурс]. – 2019/09/10. – Режим доступа: <https://www.thomasnet.com/insights/will-industry-5-0-really-be-revolutionary/>. – Дата доступа: 15.01.2021.
3. Черняк, Л. Киберфизические системы Cyber-Physical System, CPS / Л. Черняк // Деловой портал [Электронный ресурс]. – 2017/08/17. – Режим доступа: <https://www.tadviser.ru/a/374827>. – Дата доступа: 15.01.2021.
4. Индустрия 4.0 в Беларуси: быть или не быть? / Экономическая газета. 2019. – 18.05.2019. – С. 1.
5. Автоматизация проектно-конструкторских работ и технологической подготовки производства в машиностроении: в 2 т.; под ред. О.И. Семенкова. – Минск, 1976.
6. Семенков, О.И. Введение в системы автоматизации проектирования / О.И. Семенков. – Минск: Наука и техника. – 1979. – 88 с.

7. Ильющенко, А.Ф. Аддитивные технологии и порошковая металлургия / А.Ф. Ильющенко. – Минск: Медисонт. – 2019. – 268 с.

8. Дресвянников, В.А. Классификация аддитивных технологий и анализ направлений их экономического использования / В.А. Дресвянников, Е.П. Страхов // Модели, системы и сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 2 (26). – С. 16–28.

9. Зарипова, В.М. Классификация автоматизированных систем поддержки инновационных процессов на предприятии (COMPUTER AIDED INNOVATION – CAI) / В.М. Зарипова, И.Ю. Петрова, Е.С. Цырульников // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2012, № 2. – С. 26–35.

10. Кобликов, И.А. Автоматизированные системы поддержки этапа концептуального проектирования / И.А. Кобликов, С.А. Фоменков, Д.М. Коробкин // Наука сегодня: проблемы и перспективы развития : сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции, г. Вологда, 25 ноября 2015 г.: в 3 ч. Ч. 1. – Вологда: ООО «Маркер», 2015. – С. 30–33.

11. Шейников, С. Реализация практик модели-ориентированной системной инженерии в комплексном PLM-решении от Siemens Digital Industries Software / С. Шейников // CAD/CAM/CAE Observer #6 (138) 2020. – С. 39–43.

12. Обзор софта для топологической оптимизации и бионического дизайна / Top3DShop [Электронный ресурс] 27 апреля 2018 в 10:00. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/company/top3dshop/blog/411999/>. – Дата доступа: 15.01.2021.

13. Бобков, И. Топологическая оптимизация или генеративный дизайн? / И. Бобков // isicad:: Ваше окно в мир САПР ISICAD International Science Intensive Computer Aided Design services [Электронный ресурс]. – 25 июля 2018. – Режим доступа: https://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=19982. – Дата доступа: 15.01.2021.

14. Гривачевский, А.Г. Инструментальные программные средства для создания САПР сложных технических объектов / А.Г. Гривачевский, Ю.М. Кротюк // Проблемы создания информационных технологий. Сб. научных трудов. – Минск: Информационно-вычислительный центр Белстата. – Вып. 28. – 2018. – С. 23–31.

15. Микрюков, А.А. Парадигма сетевидного управления предприятием и особенности ее реализации / А.А. Микрюков // Инновации и инвестиции. – 2019. – № 5. – С. 75–78.

Поступила в редакцию 01.02.2021.