

## **Жизненный цикл детали от проектирования сложных криволинейных поверхностей в ПМ CAD до создания управляющей программы в ПМ САМ «САРУС»**

**И. И. Макаров, Н. А. Денисова**

Саровский физико-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Саров, Россия

**Аннотация.** Основные задачи, поставленные перед разработчиками отечественного программного обеспечения «Система полного жизненного цикла изделий «Цифровое предприятие» (актуальное наименование – СПЦЖ «САРУС») в РФЯЦ-ВНИИЭФ, – это следование концепции сквозного управления бизнес-процессами отраслевых предприятий на основе современных информационных технологий. Это позволяет конструировать трёхмерные объекты в защищенном формате, а также проектировать их изготовление в объеме жизненного цикла изделия. Данные задачи являются ключевыми в развитии отраслей машиностроения, авиастроения, судостроения, ракетостроения и многих других. В такой системе, как СПЦЖ «САРУС», возможна реализация всех стадий жизненного цикла проектирования.

В данной работе исследованы такие стадии, как создание управляющей параметризированной 3D-модели в системе CAD «САРУС» как первичной; разработка управляющей программы обработки для станков с ЧПУ в системе САМ «САРУС» по первичной 3D-модели. Рассмотрено построение 3D-модели детали «Компрессор низкого давления турбореактивного двигателя». По модели выполнена управляющая программа для механической обработки.

**Ключевые слова:** программный модуль CAD, программный модуль САМ, прямой метод взаимодействия; первичная 3D-модель; управляющая программа

## **The life cycle of a part starts from designing complex curved surfaces in PM CAD to creating a control program in PM CAM SARUS**

**I. I. Makarov, N. A. Denisova**

Sarov Institute of Physics and Technology – branch of the National Research Nuclear University "MEPhI", Sarov, Russia

**Abstract.** The main tasks assigned to the developers of the Russian software "Digital Enterprise Full Life Cycle System" (current name – FLCS SARUS) at RFNC-VNIIEPh are following the concept of end-to-end management of business processes of industry enterprises based on modern information technologies. It allows you to design three-dimensional objects in a secure format, as well as to design their manufacture in the scope of the product life cycle. These tasks are key to the development of the branches of mechanical engineering, aircraft construction, shipbuilding, rocket engineering and many others. In such a system as the SARUS FLCS, it is possible to implement all stages of the design lifecycle.

In this paper, we study such stages as the creation of a parameterized 3D control model in the SARUS CAD system as the primary one; the development of a control-processing program for CNC machines in the SARUS CAM system based on the primary 3D model. The construction of a 3D model of the "Low-pressure compressor of a turbojet engine" part is considered. A control program for mechanical processing is executing according to the model.

**Keywords:** CAD software module, CAM software module, direct interaction method, primary 3D model; control program.

### **Введение**

Основные задачи, поставленные перед разработчиками отечественного программного обеспечения «Система полного жизненного цикла изделий «Цифровое предприятие» (актуальное наименование – СПЦЖ «САРУС») в РФЯЦ-ВНИИЭФ, – это следование концепции сквозного управления бизнес-процессами отраслевых предприятий на основе современных информационных технологий. Это позволяет конструировать трёхмерные объекты в защищенном формате, а также проектировать их изготовление в объеме жизненного цикла изделия. Данные задачи являются ключевыми в развитии машиностроения, авиастроения, судостроения, ракетостроения и многих других отраслей.

Главной задачей современных высокотехнологических предприятий является оптимизация операций сквозного проектирования изделий в машиностроении. Сквозное проектирование является актуальной задачей, так как это в разы увеличивает производительность и эффективность в рамках

производства. Изменяя только параметры детали, не перестраивая модель полностью, можно достигнуть оптимизации процесса.

Одной из таких разработок является **Комплекс программ в защищенном исполнении «Система полного жизненного цикла изделий «Цифровое предприятие»** – система автоматизированного проектирования (САПР), разработанной на базе интегрированной инженерной программной платформы (ИИПП) и программно-математического ядра трехмерного моделирования «РГЯ». САПР представляет собой автоматизированную организационно-техническую систему, реализующую информационную технологию выполнения функций проектирования и предназначенную для автоматизации процесса проектирования. СПЖЦ «Цифровое предприятие» функционально состоит из персонала и комплекса технических, программных и других средств автоматизации его деятельности [1].

В такой системе, как СПЖЦ «САРУС», возможна реализация всех стадий жизненного цикла проектирования. В данной работе исследованы следующие стадии:

- создание управляющей параметризированной 3D-модели в системе CAD «САРУС» как первичной;
- разработка управляющей программы обработки для станков с ЧПУ в системе CAM «САРУС» по первичной 3D-модели [2].

Как пример в работе рассмотрено построение 3D-модели детали «Компрессор низкого давления турбореактивного двигателя» (рис. 1). По модели выполнена управляющая программа для механической обработки. Ожидается, что результаты данной работы позволят в дальнейшем более эффективно создавать управляемые параметризованные модели сложных форм и управляемые программы для обработки их на станках с ЧПУ.

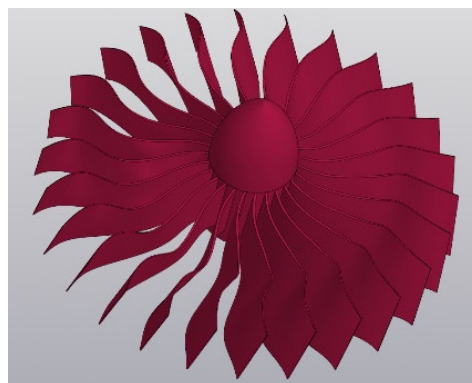


Рисунок 1. 3D-модель компрессора низкого давления турбореактивного двигателя

### Постановка задачи

Цель работы – провести практико-ориентированное исследование и аналитический анализ срабатывания программных модулей интегрированной инженерной программной платформы (ИИПП) «САРУС» путем создания первичной 3D-модели исходной детали и создания управляющей программы ее обработки в системе жизненного цикла изделия.

Задачи:

1. Создание управляющей параметризированной 3D-модели в программном модуле (ПМ) CAD системы «САРУС» как первичной;
2. Создание управляющей параметризированной 3D-модели в «КОМПАС-3D», сравнение трудоемкости построения;
3. Разработка управляющей программы обработки для станков с ЧПУ в программном модуле (ПМ) CAM системы «САРУС» по 3D-модели.

### Теория

В настоящее время для разработки производства какого-либо изделия применяются компьютерные средства моделирования на основе CAD-систем, что позволяет наглядно понимать конечный результат

и внешний вид изделия в режиме реального времени. Внедрение таких систем значительно повысило качество работы конструкторов и технологов, поскольку в них реализовано большое количество стандартных изделий в соответствии со стандартами ГОСТ и ISO. CAD (или САПР) представляет собой организационно-техническую систему, предназначенную для автоматизации процесса проектирования, состоящую из персонала и комплекса технических, программных и других средств автоматизации его деятельности [1].

Необходимо отметить, что внедрение разработанного изделия в производство требует применения современных компьютерных средств управления, обработки и хранения информации. Её эволюцию в виде нескольких «ступеней», включающих такие важные стадии, как концепция, разработка, производство, эксплуатация и окончательное выведение из эксплуатации обычно понимают как жизненный цикл технической (инженерной) системы. В последние десятилетия получили развитие технологии управления жизненным циклом изделия, которые включают в себя как CAD-системы, так и системы управления производственным процессом от создания технологии производства в соответствии с CAD-моделью до хранения архивной копии чертежей и технологии изготовления изделия.

В настоящее время политическая и экономическая обстановка диктует необходимость в использовании отечественных систем управления жизненным циклом изделия и актуальной становится цель – анализ доступных систем управления жизненным циклом изделия, построенных на импортозамещенных технологиях.

Управление данными в информационном пространстве, едином для различных автоматизированных систем, возлагается на систему управления жизненным циклом продукции – *PLM (Product Lifecycle Management)*. Технологии PLM объединяют методы и средства информационной поддержки изделий на всех этапах их жизненного цикла. При этом обеспечивается взаимодействие как средств автоматизации разных производителей, так и различных автоматизированных систем многих предприятий, то есть технологии PLM являются основой, интегрирующей информационное пространство, в котором функционируют САПР, ERP, PDM, SCM, CRM и другие автоматизированные системы разных предприятий [3].

Если вернуться к СПЖЦ «САРУС», то в Пояснительной записке Технического проекта [4; 20-23] отмечено, что программа «Система конструкторского проектирования» применяется в области разработки конструкторских документов, содержащих данные, необходимые на всех стадиях жизненного цикла изделий и их составных частей. Объектом автоматизации CAD-системы являются процессы конструкторско-технологической подготовки производства.

Система базируется на интегрированной инженерной программной платформе (далее – ТП) и состоит из программных модулей (ПМ), которые разрабатываются на единой и открытой программной архитектуре. Это обеспечивает возможность расширения состава задач за счёт разработки дополнительных программных модулей (приложений), решающих новые задачи на основе базовых платформенных инструментов.

При этом средства ТП должны предоставлять инструменты, обеспечивающие встраивание в конечную систему или комплекс систем дополнительных программных модулей, и средства, обеспечивающие их совместное (интегрированное) функционирование. Такие средства должны обеспечивать надёжную и своевременную процедуру обмена данным между CAD-системой и смежными программными модулями (рис. 2).

Интеграция между смежными программными модулями может выполняться по нескольким схемам, но на данном этапе тестирования нас интересует наиболее предпочтительный метод взаимодействия – прямое взаимодействие на основе единых программных функций и классов ТП, в связи с тем что большинство модулей конечной системы должны быть построены на основе классов и функций ТП. При таком методе взаимодействия обмен данными осуществляется прямым вызовом программного интерфейса смежного приложения или инструментов ТП [4; 24].

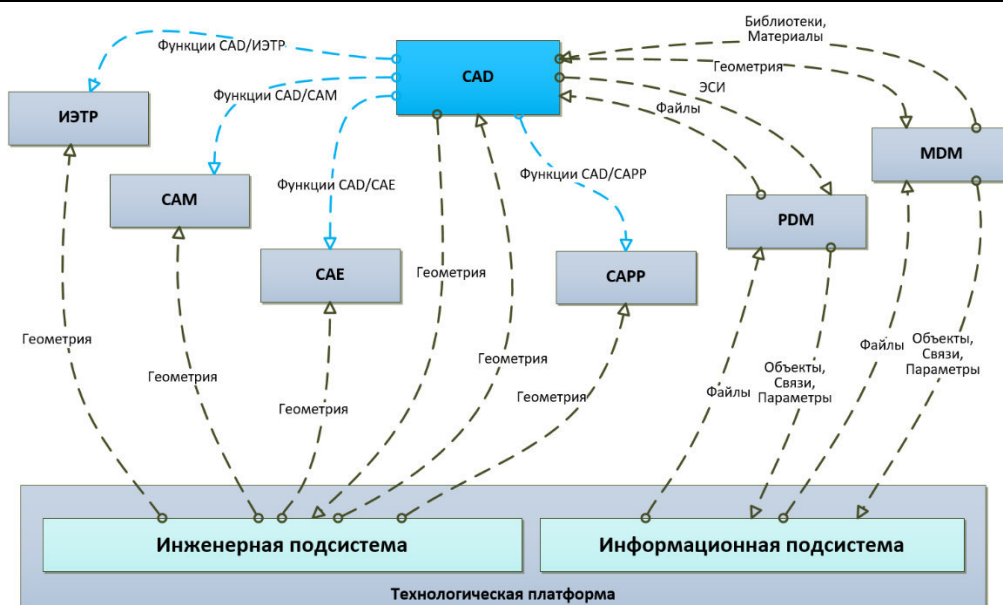


Рисунок 2. Схема взаимодействия модулей

Рассмотрим срабатывание метода и функций ПМ:

✓ CAD как средства автоматизированного проектирования, предназначенные для автоматизации двумерного и/или трехмерного геометрического проектирования, создания конструкторской и/или технологической документации, и САПР общего назначения;

✓ CAM как средства технологической подготовки производства изделий, обеспечивающие автоматизацию программирования и управления оборудования с ЧПУ или ГАПС (гибких автоматизированных производственных систем).

## Результаты экспериментов

### 1. Создание 3D-моделей детали в «САРУС» и «КОМПАС-3D»

#### 1.1. Создание управляющей параметризированной 3D-модели «Компрессор низкого давления для турбореактивного двигателя» в ПМ CAD-системы «САРУС»

Построение сложных кривых в плоскости можно получить различными способами:

- 1) сочетанием дуг (элементов окружности) и отрезков;
- 2) сочетанием нескольких сплайнов по заданным параметрам.

В решении данной задачи был выбран второй метод построения, а именно создание сплайнов по точкам. Этот выбор обусловлен тем, что параметризированные сплайны легче построить, чем сочетание дуг.

**Шаг 1.** Выбирается горизонтальная плоскость (вид сверху), это действие необходимо и пригодится для дальнейшей обработки модели в САМ-системе. Создается эскиз из двух сплайнов и дополнительных отрезков, задаются размеры.

Важной задачей на этом этапе является параметризация эскиза, т.е. ограничение геометрии будущей модели по всем степеням свободы, без допущения переопределенности.

Окрашивание эскиза в черный свет в данной программе указывает на то, что эскиз определен и построен правильно. Дальнейшее изменение параметров позволит правильно перестроить модель, не нарушая ее геометрии (рис. 3).

**Шаг 2.** Создается параллельная плоскость на расстоянии 70 мм. На ней строится второй профиль, повторяющий геометрию лопатки турбины (рис. 4).

Также необходимо задать все параметры и сделать эскиз определенным.

Стоит отметить, что толщина профиля лопатки уменьшается по мере удаления от оси вращения. Это можно регулировать длиной вспомогательных отрезков между сплайнами.

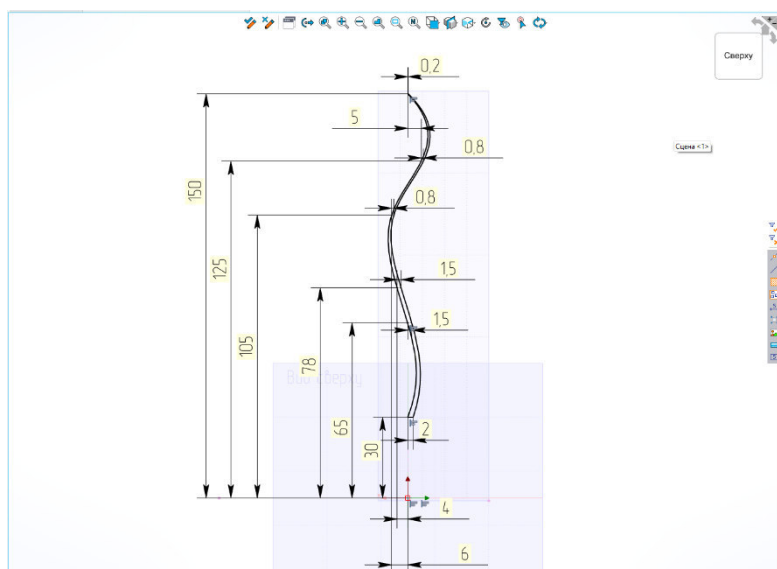


Рисунок 3. Шаг 1. Создание эскиза из двух сплайнов по заданным размерам

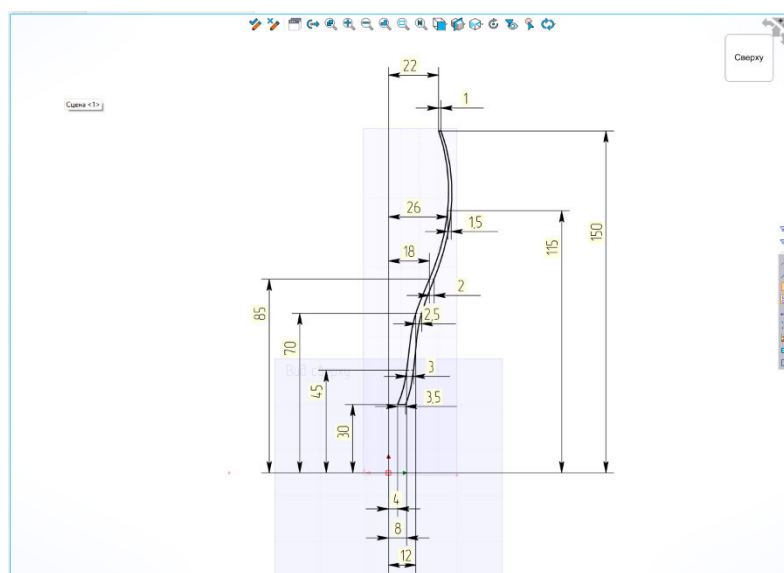


Рисунок 4. Шаг 2. Построение второго профиля на параллельной рабочей плоскости

**Шаг 3.** Создается криволинейная поверхность по сечениям. В мастере выполнения задач выбираются два сечения, и программа автоматически производит построение сложных поверхностей (рис. 5).

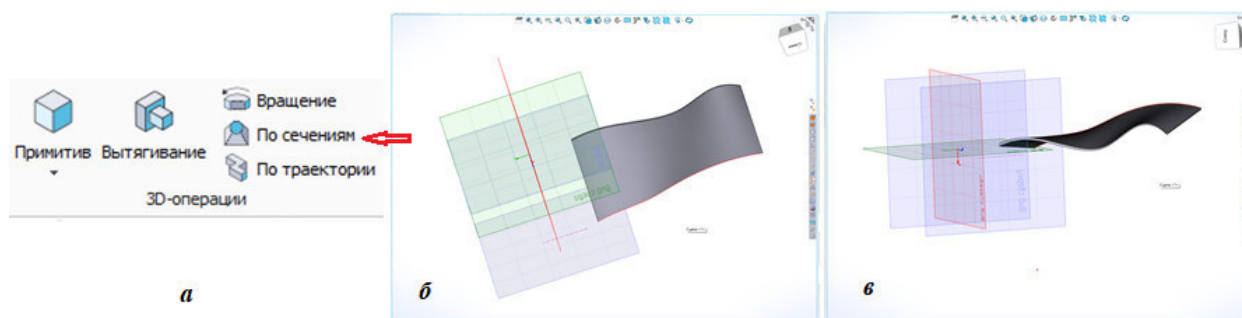


Рисунок 5. Шаг 3. Построение сложных криволинейных поверхностей:

*а* – выбор операции «По сечениям» из Ленты;  
*б, в* – созданные по эскизу криволинейные поверхности

Необходимо подчеркнуть, что «САРУС» с операцией «построение криволинейных поверхностей по сечениям» справляется лучше, чем «КОМПАС-3D».

Шаг 4. Создается эскиз конусного обтекателя для дальнейшего размещения на нем лопаток (рис. 6, а).

Шаг 5. Операцией вращения создается обтекатель (рис. 6, б).

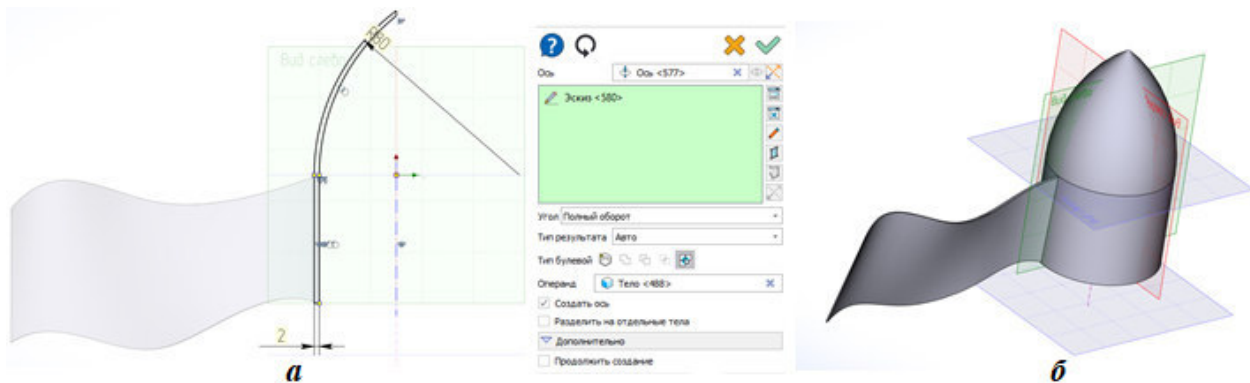


Рисунок 6. Создание конусного обтекателя:

а) шаг 4 – создание эскиза конусного обтекателя; б) шаг 5 – создание обтекателя операцией «Вращение»

Шаг 6. Операцией круговой массив создается 26 лопаток компрессора (рис. 7).

При построении кругового массива в данной программе предварительно необходимо строить ось вращения, это является недочетом.

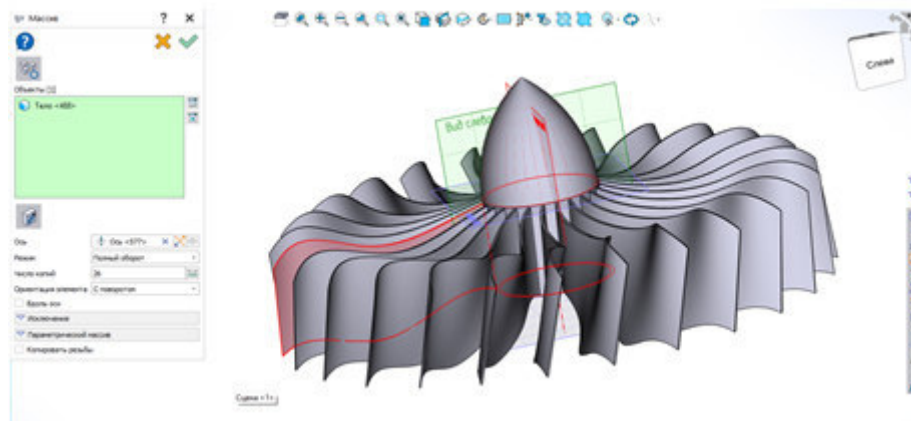


Рисунок 7. Создание лопаток компрессора операцией «Круговой массив»

### 1.2. Создание управляющей параметризированной модели в «КОМПАС-3D»

Процесс создания 3D-модели детали «Компрессор низкого давления для турбореактивного двигателя» в программе «КОМПАС-3D» аналогичен построению детали в СПЖЦ «САРУС». Алгоритм построения приведен на рисунках 8–11.

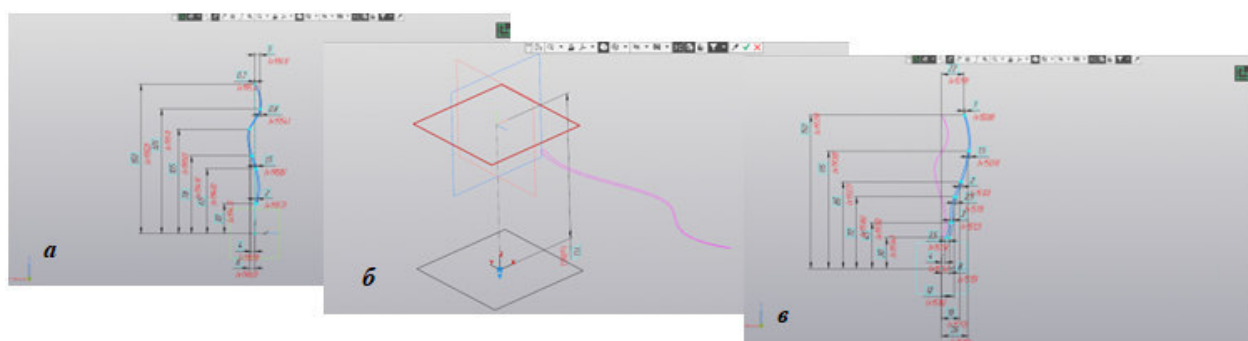


Рисунок 8. Построение эскизов лопастей: а) шаг 1 – создание эскиза из двух сплайнов по заданным размерам; б) шаг 2 – построение дополнительной рабочей плоскости; в) шаг 2 – построение второго профиля на параллельной рабочей плоскости



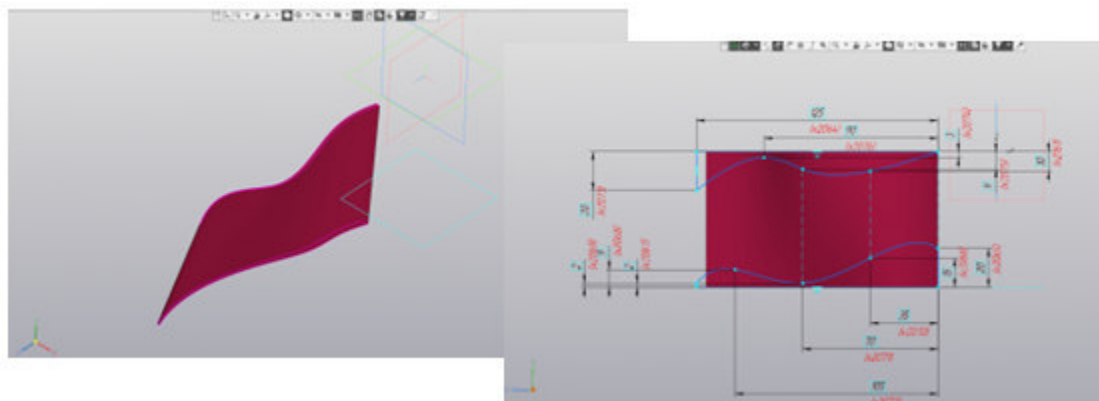


Рисунок 9. Шаг 3. Построение сложных криволинейных поверхностей «По сечениям»

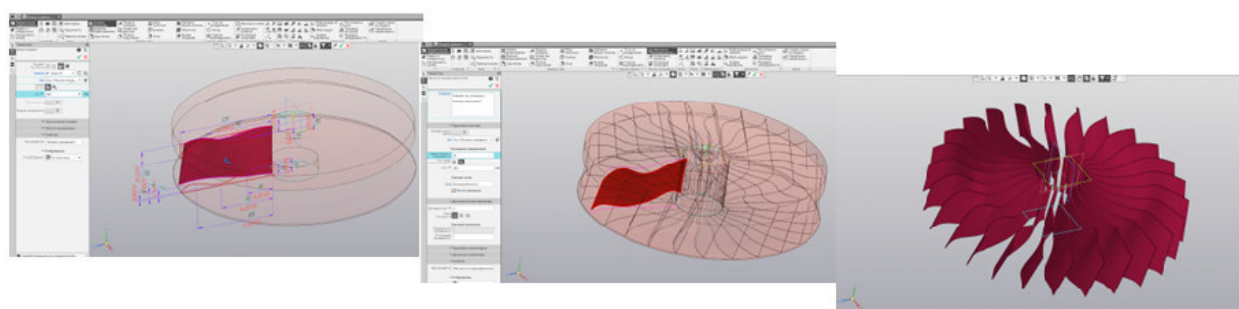


Рисунок 10. Шаг 4. Последовательность создания лопаток компрессора операциями «Круговой массив»

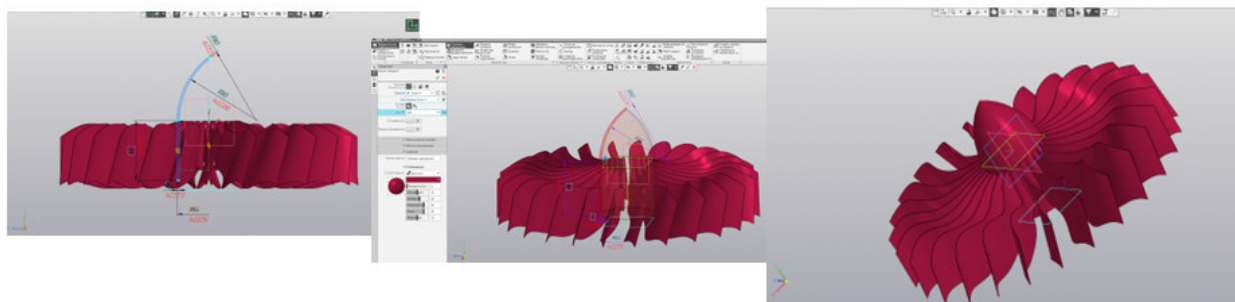


Рисунок 11. Шаг 5. Создание конусного обтекателя

По рисункам видно, что трудоемкость некоторых операций больше в «КОМПАС-3D», как уже отмечалось в предыдущем подпункте.

## **2. Разработка управляющей программы обработки для станков с ЧПУ в ПМ САМ-системы «САРУС» по созданной 3D-модели**

В данном разделе рассматриваются различные методы получения детали «Компрессор низкого давления для турбореактивного двигателя» в САМ-системе СПЖЦ «САРУС»

### **2.1. Попытка разработки управляющей программы для получения детали методом «Фрезерной обработки по двум направляющим 5D»**

**Шаг 1.** В разделе «ЧПУ» из верхней панели задач выбирается вкладка «Целевая геометрия» (рис. 12, а), на модели указываются все компоненты, требующие обработки (рис. 12, б).

**Шаг 2.** Следующая вкладка – «Заготовка» (рис. 13, а). На данном этапе необходимо определить поверхность, наиболее подходящую к исходной модели. Заготовку можно либо создать из предложенных объектов, либо отдельно построить сложную конфигурацию или применить геометрию другой обработки (рис. 13, б).

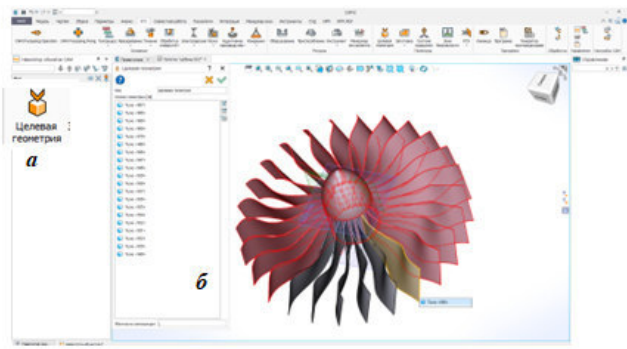


Рисунок 12. Шаг 1

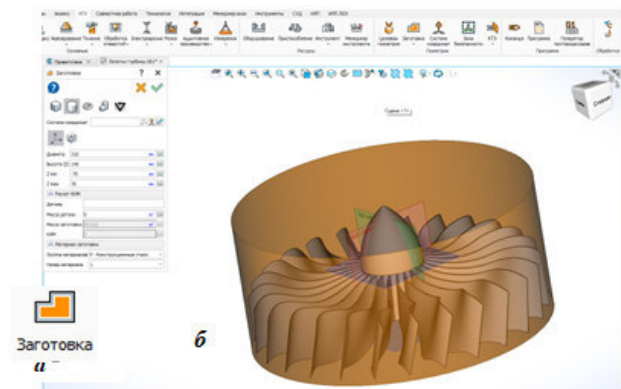


Рисунок 13. Шаг 2

**Шаг 3.** Определение системы координат (СК) (рис. 14, а). Важно учесть, что ось Z должна быть направлена вертикально, чтобы основание детали лежало в плоскости XOY (рис. 14, б). Положение оси Z определено параметрами большинства станков с ЧПУ.

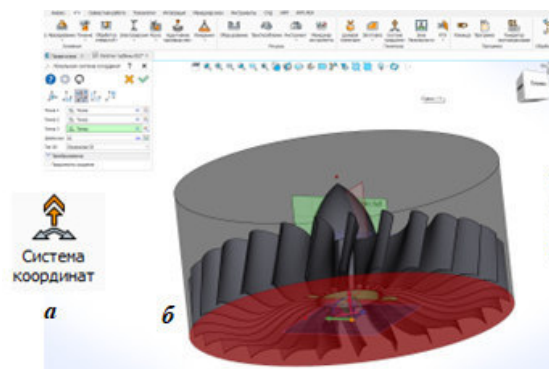


Рисунок 14. Шаг 3

**Шаг 4.** Выбор зоны безопасности (ЗБ). Данная область необходима для осуществления нерабочего перемещения инструмента (быстрые подачи) вне этой зоны (рис. 15).

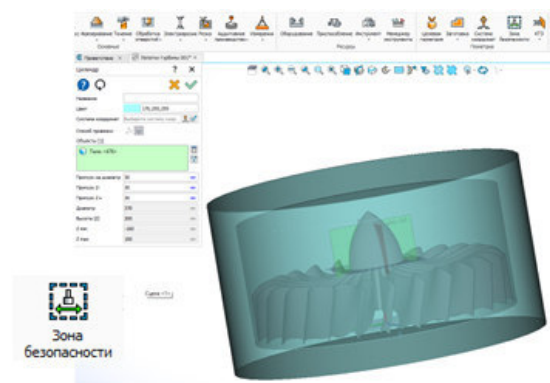


Рисунок 15. Шаг 4

**Шаг 5.** Выбор обрабатывающей программы «Фрезерование – по двум направляющим 5D» (рис. 16, а). Задаются основные параметры (рис. 16, б). Большинство отправных параметров программа задает автоматически. После заполнения данных для обработки (рис. 16, в) производится расчет (рис. 16, г).



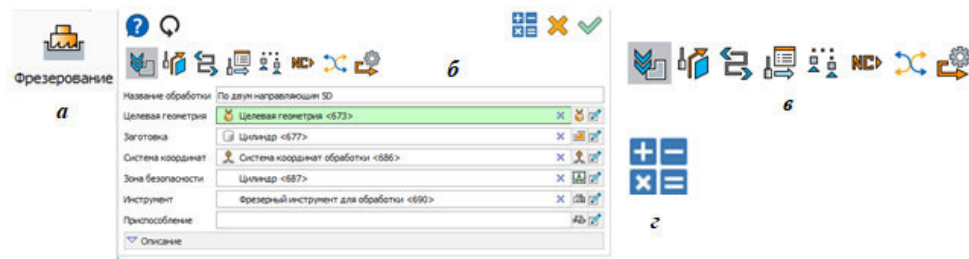


Рисунок 16. Шаг 5

**Шаг 6.** Реализация анимации обработки (рис. 17, а). Получение управляющих программ (G-код) для станков с ЧПУ – рис. 17, б.

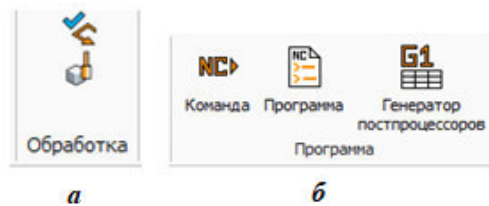


Рисунок 17. Шаг 6

**Вывод.** В данной работе не получилось произвести полноценную обработку с выводом программы на станок. Мы считаем, что это связано в первую очередь с тем, что такую сложную поверхность практически невозможно получить фрезерной обработкой. Во-вторых, технология требует более квалифицированного подхода.

**2.3. Попытка разработки управляющей программы для получения детали методом «Аддитивное производство (Послойная наплавка FFF)»**

**Шаг 1.** Создается: целевая геометрия, СК, ЗБ (рис. 18, а). Для упрощения расчета процесса обработки в качестве целевой геометрии выбирается одна лопасть и обтекатель компрессора. В разделе аддитивное производство выбирается «Послойная наплавка FFF» (рис. 18, б).

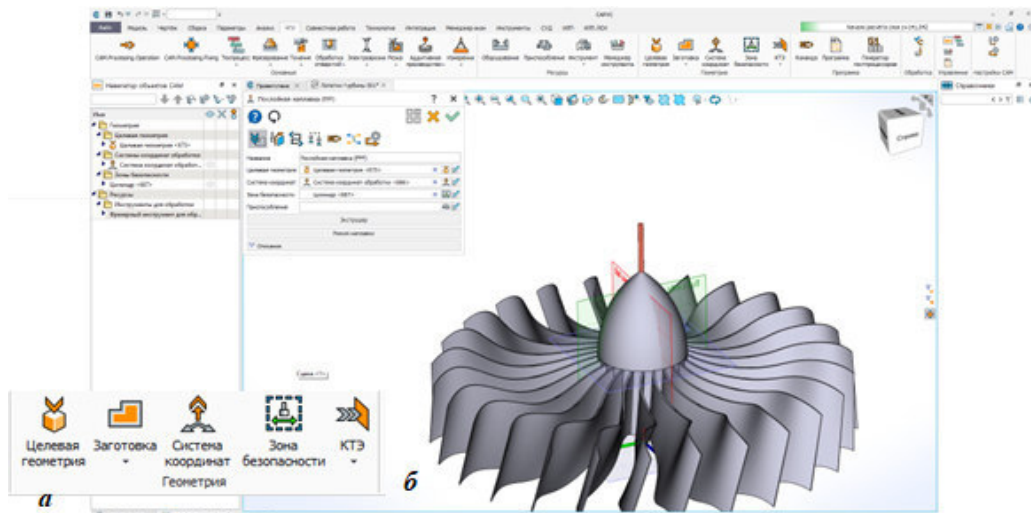


Рисунок 18. Шаг 1. Послойная наплавка FFF

**Шаг 2.** Для данной обработки задаются параметры, показанные на рисунках 19 и 20.

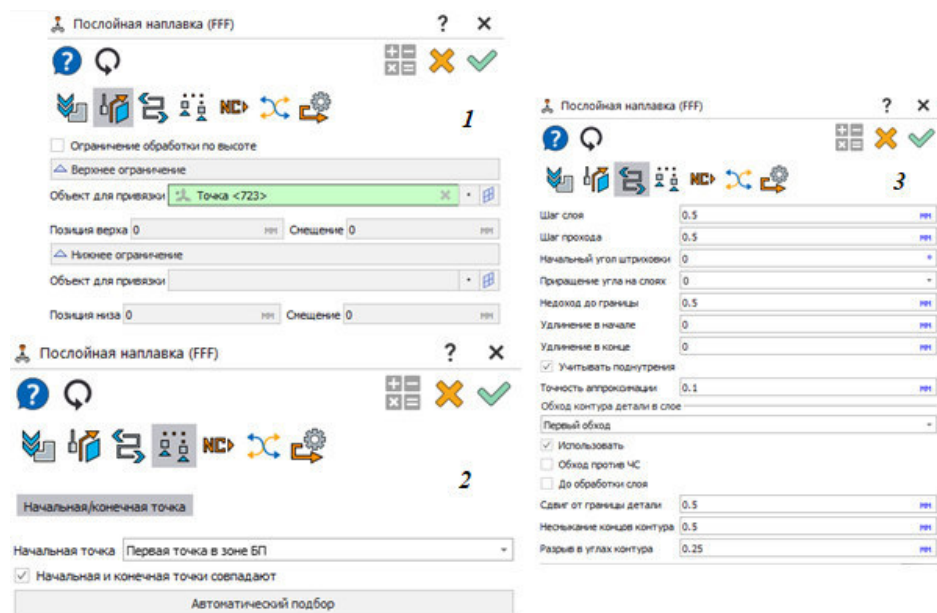


Рисунок 19. Шаг 2. Поэтапная настройка диалоговых окон на послойную наплавку

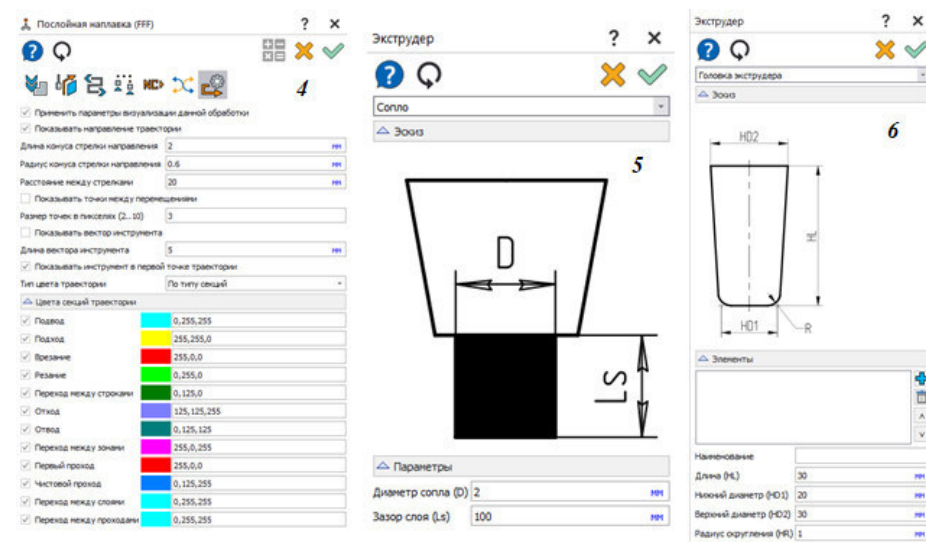


Рисунок 20. Шаг 2. Продолжение настройки

**Шаг 3.** Производится расчет программы обработки (рис. 21, а). Замечен первый положительный результат, а именно появление траектории обработки – розовый контур (рис. 21, б).

**Шаг 4.** Производится имитация обработки «Послойная наплавка FFF». Инструмент (в нашем случае сопло) движется по контуру, наплавляя материал; создается деталь (рис. 21, в).

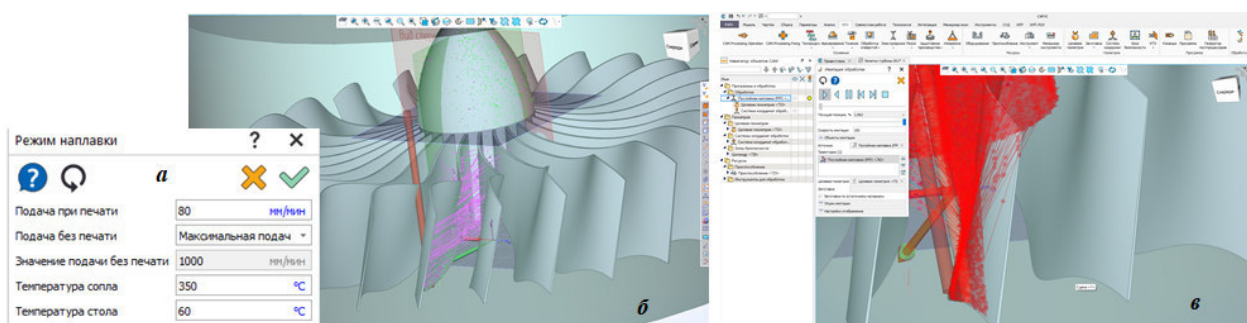


Рисунок 21. Расчет программы обработки

**Вывод.** Реализация «Послойной наплавки FFF» при изготовлении детали со сложными криволинейными поверхностями изделия «Компрессор низкого давления» прошла успешно. Были получены контур обработки, имитация обработки.

2.4. Попытка разработки управляющей программы для получения детали методом «Электроэрозионной двухконтурной обработки»

**Шаг 1.** Создаются целевая геометрия, заготовка, СК, ЗБ (рис. 22, а). В качестве целевой геометрии выбирается сборочная единица «Лопатка» основного изделия «Компрессор низкого давления». В разделе электроэрозионная обработка выбирается «Электроэрозионная двухконтурная обработка» (рис. 22, б)

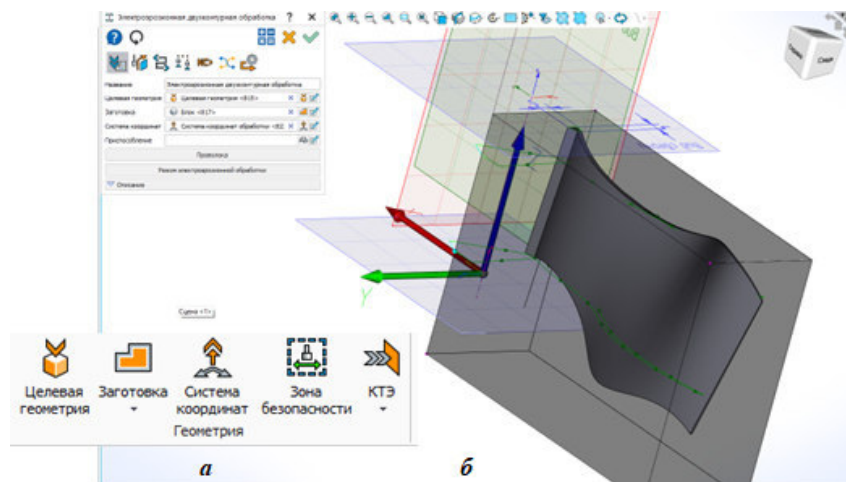


Рисунок 22. Настройка программы на электроэрозионную двухконтурную обработку

**Шаг 2.** Для данной обработки задаются следующие параметры (рис. 23, а, б, в): выбираются объекты верхнего и нижнего контуров по кривым целевой геометрии, находящимся в соответствующих плоскостях; задаются верхние точки привязки для входа и выхода инструмента–проволоки по верхнему контуру; нижние точки привязки соответственно для прохода инструмента по нижнему контуру.

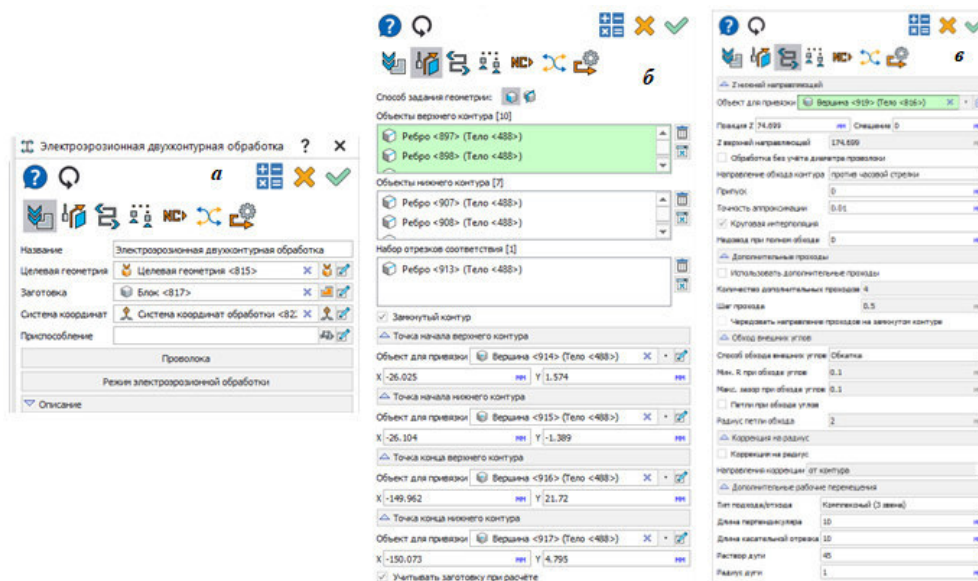


Рисунок 23. Выбор параметров для электроэрозионной двухконтурной обработки

**Шаг 3.** Осуществлена имитация обработки. В качестве инструмента используется проволока. Движение проволоки происходит по двум ранее заданным контурам одновременно (рис. 24).

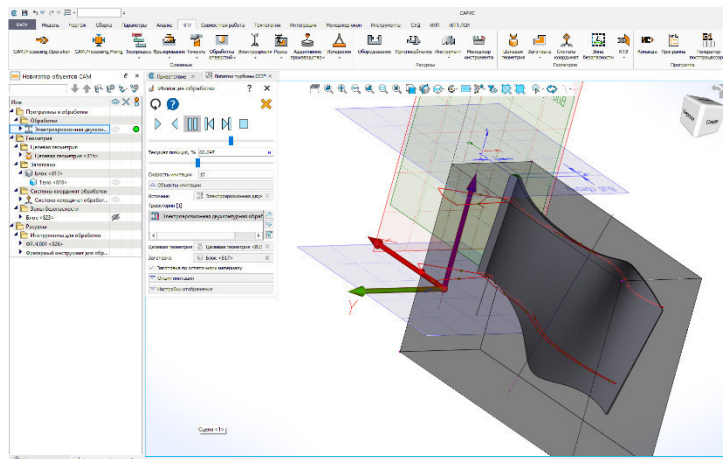


Рисунок 24. Результат настройки на электроэрозионную двухконтурную обработку

**Вывод.** Произведена двухконтурная электроэрозионная обработка сборочной единицы «Лопатка компрессора низкого давления». Наблюдается существенное отличие по скорости обработки, данная обработка по сравнению с предыдущими вариантами имеет большую производительность.

### Обсуждение результатов

#### 1. Сравнение построения 3D-модели в СПЖЦ «САРУС» с построением в ПО «КОМПАС-3D»

Преимущества CAD-системы «САРУС»:

✓ возможность построения сложных поверхностей при осуществлении операции выдавливания по трем и более плоскостям, в то время как в программе «КОМПАС-3D» корректно строятся сложные криволинейные поверхности только по двум плоскостям.

Недостатки CAD-системы «САРУС»:

- ✓ не имеет функцию отображать степени свободы, что немаловажно при построении параметризованного эскиза;
- ✓ не ловит оси начала координат при попытке создания кругового массива;
- ✓ не позволяет отменить выделенную линию путем повторного нажатия на нее;
- ✓ не ловит привязки к центру созданной ранее окружности;
- ✓ не позволяет вырезать в двух направлениях сразу, в каждом направлении на свою глубину, то есть не создает отдельные параметры для каждого направления;
- ✓ некорректно производит операцию «усечение кривой»;
- ✓ на данный момент не имеет рабочей функции «создать исполнение». Она есть, но только в замысле.

**Вывод.** СПЖЦ «САРУС» имеет ряд проблем, встречающихся при проектировании. Разработчики данной программы создают по результатам тестирований более новые версии.

#### 2. Анализ разработки управляющей программы обработки для станков с ЧПУ в ПМ САМ

В СПЖЦ «САРУС» проведены попытки разработки управляющих программ для разных видов механической обработки лопасти. Результативно проведена электроэрозионная двухконтурная обработка. Остальные виды обработки не проведены или проведены не полностью. Мы считаем, что это связано, во-первых, с тем, что такую сложную поверхность практически невозможно получить фрезерной обработкой. Во-вторых, технология требует более квалифицированного подхода.

В ПО «КОМПАС-3D» такой программный модуль не предусмотрен. Необходимо первичную 3D-модель экспортировать в другое ПО, например Gemma-3D.

### Выводы

Цели данного проекта достигнуты:

- изучены основные принципы построения сложных криволинейных поверхностей;
- попытки разобраться в алгоритмах создания управляющих программ для обработки на станках с ЧПУ привели к успеху.



Решены задачи:

- успешно разработаны 3D-модели в ПМ САД «САРУС» и «КОМПАС-3D»;
- проведено сравнение, выявлены преимущества и недостатки СПЖЦ «САРУС»;
- разработаны УП обработок в (ПМ) САМ-системы «САРУС» по 3D-модели:
  - фрезерная обработка по двум направляющим 5D – требует доработки;
  - послойная наплавка FFF – успешно;
  - электроэрозионная двухконтурная обработка – успешно.

Стоит отметить, что программный модуль САМ-системы «САРУС» находится на стадии тестирования и активной доработки.

#### **Источник финансирования**

Договор от 25 марта 2024 г. № 96-2024/244 на выполнение научно-исследовательской работы по теме «Проведение научных исследований в интересах ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» с использованием результатов для актуализации образовательных программ подготовки специалистов с высшим профессиональным образованием для ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Задача 10 «Исследование программно-аппаратных решений в области цифровых технологий, возможностей их отраслевого применения, разработка и версионное тестирование компонентов полностью защищенной системы полного жизненного цикла среднего класса СПЖЦ V3 «САРУС».

#### **Благодарность**

Авторы благодарят кафедру цифровых технологий СарФТИ-НИЯУ «МИФИ» под руководством О.В. Кривошеева, к.т.н., заведующего кафедрой, зам. директора ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» по технологиям полного жизненного цикла – директора института цифровых технологий (ИТЦ) – главного конструктора СПЖЦ.

#### **Список литературы**

1. ГОСТ 34.003-90. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Термины и определения.
2. Комплекс программ в защищённом исполнении «Система полного жизненного цикла изделий «Цифровое предприятие»: Основная версия программного модуля. «Система конструкторского проектирования» (версия 2) / Руководство оператора 07623615.00423-06 34 01. 2021. 338 с.
3. Phiri Michael. Information Technology in Construction Design. London: Thomas Telford Publishing, 1999. P. 52. ISBN 0-7277-2673-0.
4. Комплекс программ в защищённом исполнении «Система полного жизненного цикла изделий «Цифровое предприятие»: Программный модуль «Система конструкторского проектирования». Пояснительная записка технического проекта 07623615.00423-12 81 01. Часть 1. 2021. 924 с.