
УДК 087.2

DOI: 10.25686/978-5-8158-2474-4-2025-744-754

Исследование срабатывания функций группы «Ограничения» при построении фасонных поверхностей в программном обеспечении «САРУС»

А. С. Быкова, Н. А. Денисова

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

Аннотация. В процессе тестирования вновь разрабатываемого в РФЯЦ-ВНИИЭФ САПР «Система полного жизненного цикла изделий «Цифровое предприятие» или СПЖЦ «САРУС» студентами СарФТИ НИЯУ МИФИ выявляются оптимальные алгоритмы построения поверхностей разного рода, характерных при конструировании деталей машиностроения. Построение фасонных поверхностей является важной задачей в проектировании и моделировании в CAD. Результаты трех этапов тестирования программного модуля CAD СПЖЦ «САРУС» показали, что при моделировании объектов сложных форм выявлены проблемы построения поверхностей, имеющих криволинейные образующие, особенно радиусные линии. Поиск оптимальных алгоритмов построения подобных поверхностей привел к необходимости выявления срабатывания функций группы «Ограничения» при построении параметрической модели. В работе исследован метод построения криволинейных поверхностей средствами ПМ CAD, подробно описан оптимальный порядок построения радиусных кривых с учетом выявленных особенностей в работе команд. Показано, что СПЖЦ «САРУС» представляет собой инструмент, позволяющий создавать сложные трехмерные модели с использованием различных функций и операций, а функции группы «Ограничения» играют ключевую роль в срабатывании проектных задач, связанных с созданием фасонных поверхностей.

Ключевые слова: программный модуль CAD, 3D-моделирование, фасонная поверхность, радиусные линии, скругления.

Implementation of testing of the new SARUS CAD system into the educational process of the university

A. S. Bykova, N. A. Denisova

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

Abstract. In the process of testing the newly developed RFNC-VNIIEF CAD "Digital Enterprise Full Life Cycle System" or "SARUS" CAD, students of the SarFTI of the National Research Nuclear University MEPhI identify optimal algorithms for constructing surfaces of various kinds, typical for the design of mechanical engineering parts. The construction of shaped surfaces is an important task in CAD design and modeling. The results of the three stages of testing the CAD software module of the FLCS "SARUS" showed that problems were identified in constructing surfaces with curved shapes, when modeling objects of complex shapes, especially radius lines. The search for optimal algorithms for constructing such surfaces led to the need to identify the operation of the functions of the "Constraints" group when constructing a parametric model. The paper examines the method of constructing curved surfaces using PM CAD, describes in detail the optimal procedure for constructing radius curves, taking into account the identified features in the work of teams. It is shown, that the FLCS "SARUS" is a tool that allows you to create complex three-dimensional models using various functions and operations, and the functions of the "Constraints" group play a key role in triggering design tasks related to the creation of shaped surfaces.

Keywords: CAD software module, 3D modeling, shaped surface, radius lines, rounding.

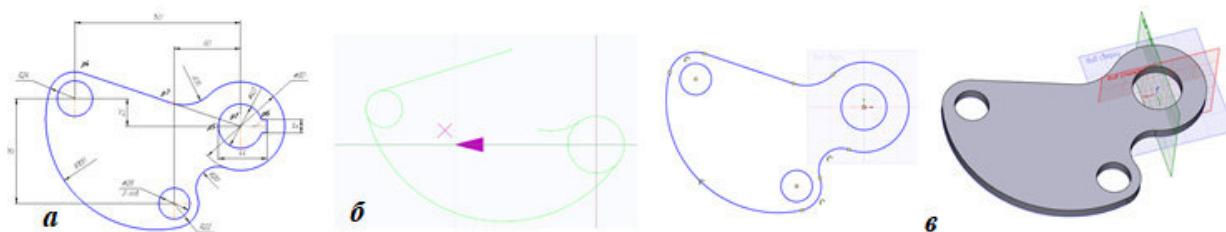
Введение

В процессе тестирования вновь разрабатываемого в РФЯЦ-ВНИИЭФ САПР «Система полного жизненного цикла изделий «Цифровое предприятие» или СПЖЦ «САРУС» студентами СарФТИ НИЯУ МИФИ выявляются оптимальные алгоритмы построения поверхностей разного рода, характерных при конструировании деталей машиностроения.

На предыдущих этапах исследования при тестировании версий 1.0.17.9 и 2023.1.0.1-RC16 [1, 2] мы обратили внимание на необходимость выявления возможностей применения операций, предлагаемых интерфейсом ПМ CAD по построению криволинейных поверхностей в 2D- и 3D-режимах при создании 3D-моделей деталей машиностроения различной сложности.

Так, например, при попытке построения детали «Шаблон», которую можно представить как объединение простейших геометрических фигур, сопрягаемых радиусными кривыми (рис. 1, а), в версии 1.0.16.23 построение не осуществилось командой «Сопряжения», как в Компас-3D. Необходимо было строить окружности с удалением лишних кривых. При выборе команды «Кривые, удаление и образка кривой» всплывала критическая ошибка или, если удавалось что-то обрезать, эскиз слетал, необходимо было перестроение (рис. 1, б). При повторении построения в более поздней версии (1.0.19.76) 3D-модель детали была построена (рис. 1, в), но замечена нестабильность программы: операции, которые успешно выполнялись при построении модели, могут не выполняться (программа выдаёт критическую ошибку) при построении по тому же алгоритму. После успешного построения детали при ее повторном построении по тому же алгоритму некоторые операции не выполняются. Выявлена некорректная работа размеров.

По оценке исполнителей, трудоемкость построения выше, чем в остальных сравниваемых ПО [1].



Ясно, что построение криволинейных поверхностей с фасонной образующей является важной задачей в проектировании и моделировании в CAD.

Исходя из вышеизложенного, в Техническом задании для реализации следующего этапа практико-ориентированного исследования запланированы следующие действия:

- разработка алгоритмов создания 3D-моделей **деталей средней сложности** с различным типом криволинейных поверхностей с применением предлагаемых программным обеспечением 3D-операций;
- формулирование аналитического вывода рациональности построений;
- выявление недостатков построения криволинейных поверхностей в ПО «СПЖЦ ЦП»; формулирование рекомендаций для доработки ПМ.

Постановка задачи

Целью тестирования на данном этапе является исследование возможности применения операций, предлагаемых интерфейсом ПМ CAD, входящему в систему «САРУС», по построению криволинейных поверхностей в 2D- и 3D-режимах в деталях средней сложности с элементами сложной формы с теоретическим анализом предлагаемых функций построения.

Задачи:

- тестирование ПМ CAD по срабатыванию выполнения функций, операций и команд построения, рекомендуемых разработчиком при построении 3D-модели детали с фасонной образующей, сформированной радиусными линиями;
- описание логики выбора и разработки оптимального алгоритма построения криволинейных поверхностей в ПМ CAD «САРУС» в 3D-модели детали «Крюк чалочный» (рис. 2);
- анализ работоспособности алгоритмов построения скруглений при построении 3D-модели;
- аналитическое сравнение построений исходной детали с ПО «КОМПАС-3D»;
- подготовка методических материалов по обучению работы с ПМ CAD «САРУС» студентов по направлению подготовки 15.03.04 – Конструкторско-технологическое обеспечение

машиностроительных производств, а также специалистов, имеющих опыт работы с рядом САПР в направлении конструкторской подготовки.



Рисунок 2. Пример изделия «Крюк чалочный»

Теория

1. Криволинейная поверхность

Определим понятие криволинейной поверхности как основы детали машиностроения, конструкирование которой нас интересует, с использованием терминологического словаря по начертательной геометрии [4].

Согласно терминологии начертательной геометрии, любая деталь машин рассматривается как ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ТЕЛО – некоторая замкнутая часть пространства, ограниченная плоскими или кривыми поверхностями.

ПОВЕРХНОСТЬ в элементарной геометрии определяется как граница тела или как след движущейся линии (не вдоль себя). Различают поверхности плоские, выпуклые, вогнутые, а в различных разделах математики они имеют более сложную классификацию. В начертательной геометрии пользуются кинематическим способом образования поверхности путем непрерывного перемещения образующей линии в пространстве, причем производящая линия при своем движении может как сохранять свою форму, так и менять ее.

ЛИНИЯ КРИВАЯ определяется как траектория непрерывно движущейся точки в постоянно изменяющемся направлении. Кривая, все точки которой принадлежат одной плоскости, называется плоской. Кривая, все точки которой не могут принадлежать одной плоскости, называется пространственной. Такая линия имеет двоякую кривизну. Кривые линии, как плоские, так и пространственные, могут быть закономерными или случайного вида. Свойства кривых изучаются в аналитической и дифференциальной геометрии, а также в топологии. Единственная кривая, изучаемая в элементарной геометрии, – окружность.

ПОВЕРХНОСТЬ ВРАЩЕНИЯ – это поверхность, образованная вращением какой-либо образующей линии вокруг неподвижной прямой – оси. Производящая (образующая) линия может быть прямой, кривой, ломаной и составной; замкнутой и незамкнутой; плоской и пространственной. Совсем необязательно, чтобы образующая лежала в плоскости, проходящей через ось вращения (например, прямая образующая однополостного гиперболоида вращения). Если начало и конец незамкнутой линии лежат на оси вращения, то поверхность получится замкнутая. Всякая замкнутая поверхность вращения образует тело вращения.

ПОВЕРХНОСТИ ВТОРОГО ПОРЯДКА. В аналитической геометрии так называют поверхности, уравнения которых в прямоугольной системе координат – уравнения второй степени. К ним относятся сфера, эллипсоиды, однополостной и двуполостной гиперболоиды, эллиптический и гиперболический параболоиды, конические и цилиндрические поверхности. Прямая линия пересекает такие поверхности в двух точках.

ПОВЕРХНОСТИ КИНЕМАТИЧЕСКИЕ – это поверхности, образуемые движением какой-либо линии (поверхности) в пространстве, например цилиндрические или конические поверхности. Движущийся элемент называется производящим или образующим. У цилиндра или конуса образующая – прямая линия. Перемещение производящей линии называется поступательным, если все ее точки перемещаются на равные расстояния и по параллельным траекториям.

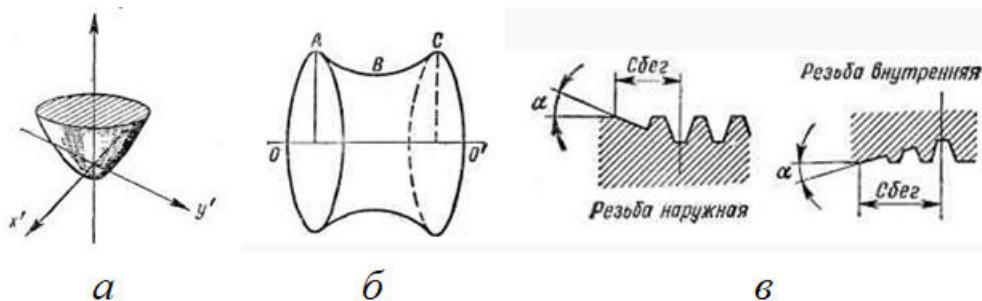


Рисунок 3. Примеры криволинейных поверхностей:
а – параболоид вращения; б – катеноид; в – резьбовые поверхности

Таким образом, можно заключить, что все детали в машиностроении являются комбинированными геометрическими телами (рис. 3), состоящими из примитивных элементов, представляющими собой простые геометрические тела.

Тогда нас будут интересовать типичные детали и их поверхности: валы ступенчатые, сферические поверхности, резьбовые и зубчатые поверхности, корпусные детали с элементами криволинейных поверхностей – сопряжения плоских и кривых поверхностей.

СОПРЯЖЕНИЕ ЛИНИЙ определяется как плавный переход одной линии в другую. Общая для этих линий точка называется точкой сопряжения или точкой перехода. Точка сопряжения двух дуг окружностей лежит на линии их центров. Точка касания прямой и окружности служит точкой их сопряжения.

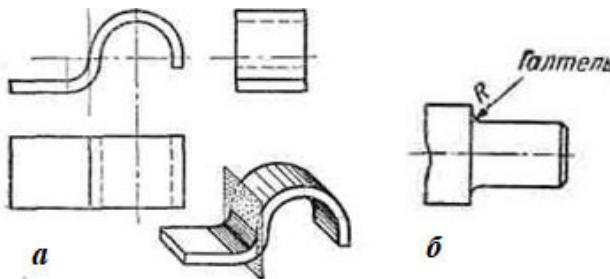


Рисунок 4. Примеры сопряжений:
а – пример детали с сопряжением поверхностей; б – эскиз ступенчатого вала с галтелью

СОПРЯЖЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ есть плавный переход одной поверхности в другую. Линия касания поверхностей называется линией разграничения. Ее показывают только на той проекции, перпендикулярно которой можно провести через линию разграничения поверхность (цилиндр, плоскость), касательную к обеим сопрягаемым поверхностям (рис. 4, а).

ГАЛТЕЛЬ (нем. Hohlkehle — выкружка) – криволинейная поверхность плавного перехода от меньшего сечения вала к плоской части заплечика или буртика (рис. 4, б).

2. Анализ группы «Ограничения» в САПР

Построение фасонных поверхностей является важной задачей в проектировании и моделировании в различных областях, таких как CAD (Computer-Aided Design) и CAM (Computer-Aided Manufacturing). Программное обеспечение «САРУС» представляет собой мощный инструмент, позволяющий создавать сложные трехмерные модели с использованием различных функций и инструментов. В данном исследовании рассматриваются функции группы «Ограничения», которые играют ключевую роль в срабатывании проектных задач, связанных с созданием фасонных поверхностей.

Фасонные поверхности, как описано выше, характеризуются сложной геометрией и могут принимать различные формы, такие как цилиндры, конусы, сферы и более сложные сплайны. Эти поверхности имеют широкий диапазон применения: от автомобилей и самолетов до медицинских устройств и художественных изделий.

Программное обеспечение «САРУС» разработано для эффективного моделирования и анализа, позволяя пользователям работать с большим объемом данных и приложений. Исследование показало, что возможности «САРУС» в контексте фасонных поверхностей значительно расширяются благодаря наличию функции «Ограничения».

Функции группы «Ограничения» в «САРУС» позволяют задавать дополнительные параметры, которые регулируют форму и свойства создаваемых поверхностей. Эти ограничения могут включать, но не ограничиваться:

- 1) геометрическими – параметрами размеров и форм;
- 2) физическими – свойствами материалов;
- 3) технологическими – условиями производства и обработки.

В 90-е годы XX века началось активное развитие CAD-систем, которые вскоре стали стандартом в индустрии. Первые версии программного обеспечения «САРУС» появились на рынке в начале 2010-х, предоставляя пользователям инструменты для работы с 2D- и 3D-геометрией. В процессе развития системы специалисты начали внедрять функции ограничения, что позволило улучшить качество проектирования и повысить точность моделирования (рис. 5).

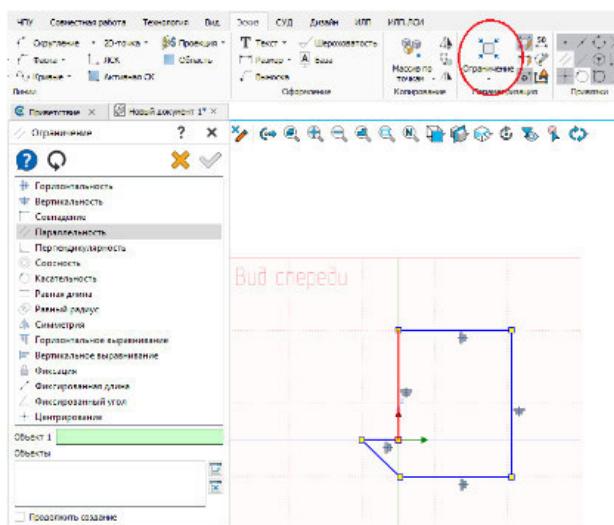


Рисунок 5. Функция «Ограничение» на Ленте CAD «САРУС»

На сегодняшний день функции группы «Ограничения» в «САРУС» продолжают развиваться и актуализироваться. Операторы ограничений позволили значительно упростить процесс создания сложных фасонных поверхностей, улучшив автоматизацию процессов проектирования. Исследования показывают, что применение этих функций снижает ошибки в проектировании на 25-30 %.

Результаты экспериментов

1. Исследование оптимальных алгоритмов построения криволинейных поверхностей в ПМ CAD ПО «СПЖЦ «САРУС»

Объектом исследования стали функции группы «Ограничения», которые интегрированы в программное обеспечение «САРУС». Они представляют собой важный инструмент, позволяющий проектировщикам создавать сложные геометрические формы. Предметом исследования являются свойства и качества этих функций, а также возможность их применения для повышения качества проектирования и точности создания фасонных поверхностей.

Анализ детали. Деталь «Крюк чалочный» (рис. 6) можно представить как объединение простейших геометрических фигур, а именно окружностей, сопрягаемых радиусными кривыми.

Стратегия построения 3D-модели. Построение можно выполнить операцией «Вытягивание» через создание эскиза. За начало координат принимаем центр окружности диаметром 56 мм. Последовательность построения показана на рисунках 7, 8.

На начальных этапах, согласно размерам эскиза, производим построение окружностей.

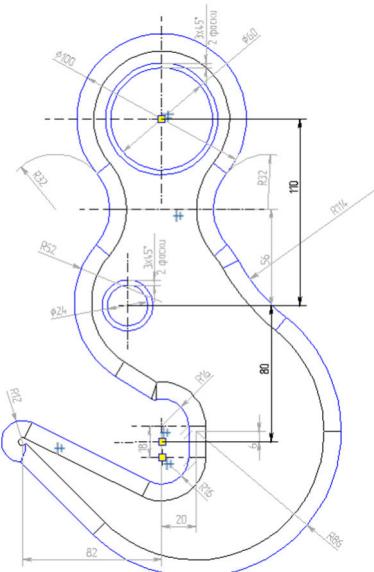


Рисунок 6. Эскиз детали «Крюк чалочный». Эскиз выполнен в ПМ САД «САРУС»

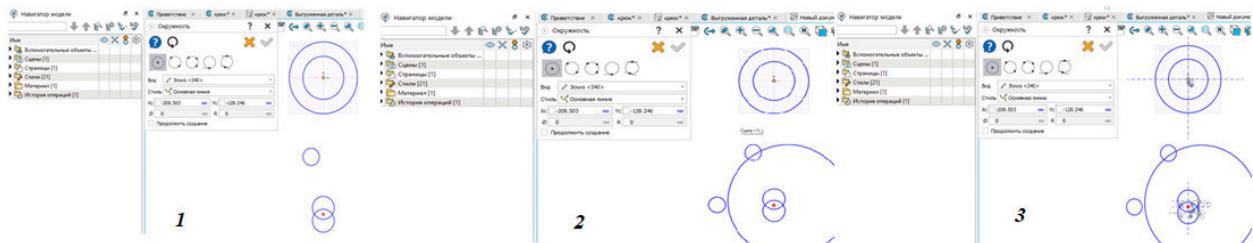


Рисунок 7. Этапы построения эскиза с помощью окружностей

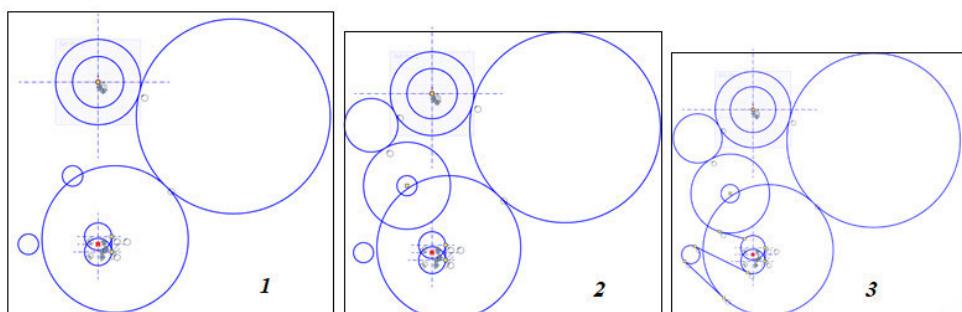


Рисунок 8. Этапы построения эскиза с примерным представлением очертания крюка

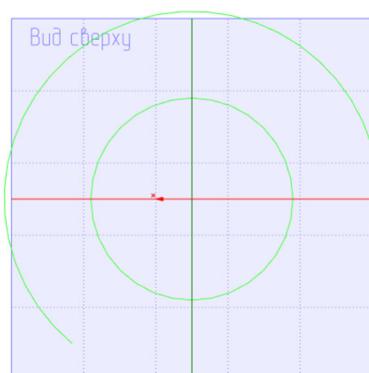


Рисунок 9. Недостроенный эскиз для построения 3D-модели детали «Крюк чалочный»

Построение не может осуществляться командой «Сопряжения», как в ПО «Компас». Необходимо строить окружности с удалением лишних кривых. При выборе команды «Кривые» при удалении и обрезке кривой всплывает критическая ошибка или, если удастся что-то обрезать (рис. 9), эскиз слетает – перестраивается.

К сожалению, на данном этапе проектирования эскиза произошла ошибка (выделена красным овалом на рис. 10), при изменении диаметра одной из окружностей, остальные элементы начинают изменяться автоматически. Такое бывает, когда программа содержит большое количество элементов.

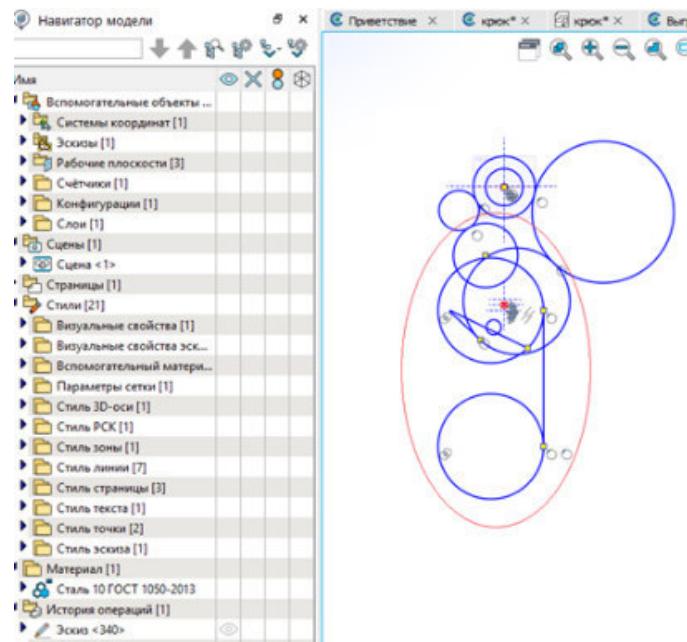


Рисунок 10. Возникновение ошибки при большом количестве элементов

После исправления ошибок эскиз выглядит так, как показано на рисунке 11. Это уже окончательный вид эскиза. На данном этапе (при удалении лишних элементов) ошибок не возникало.

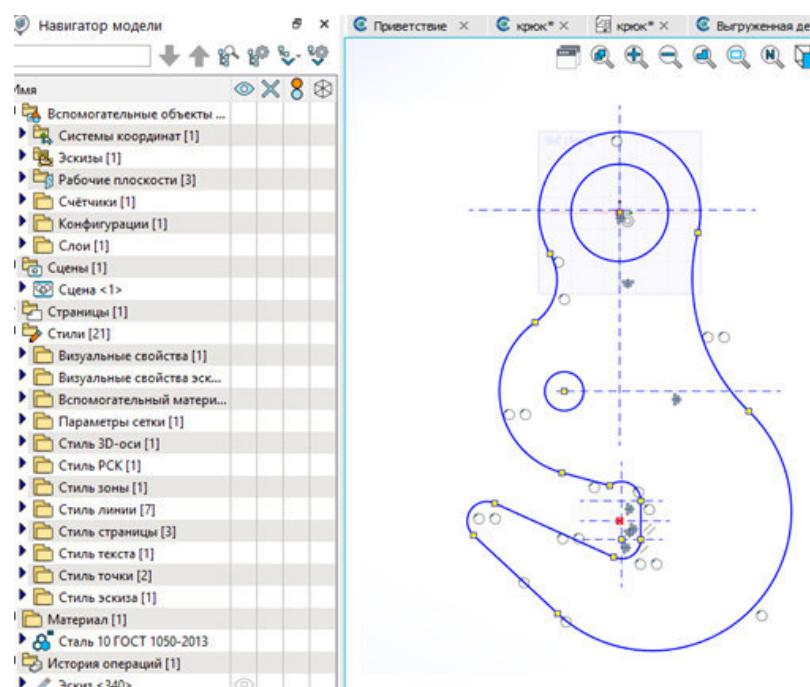


Рисунок 11. Окончательный вид эскиза

Вариант разработки 3D-модели крюка имеет вид, представленный на рисунке 12, но это не окончательный вариант.

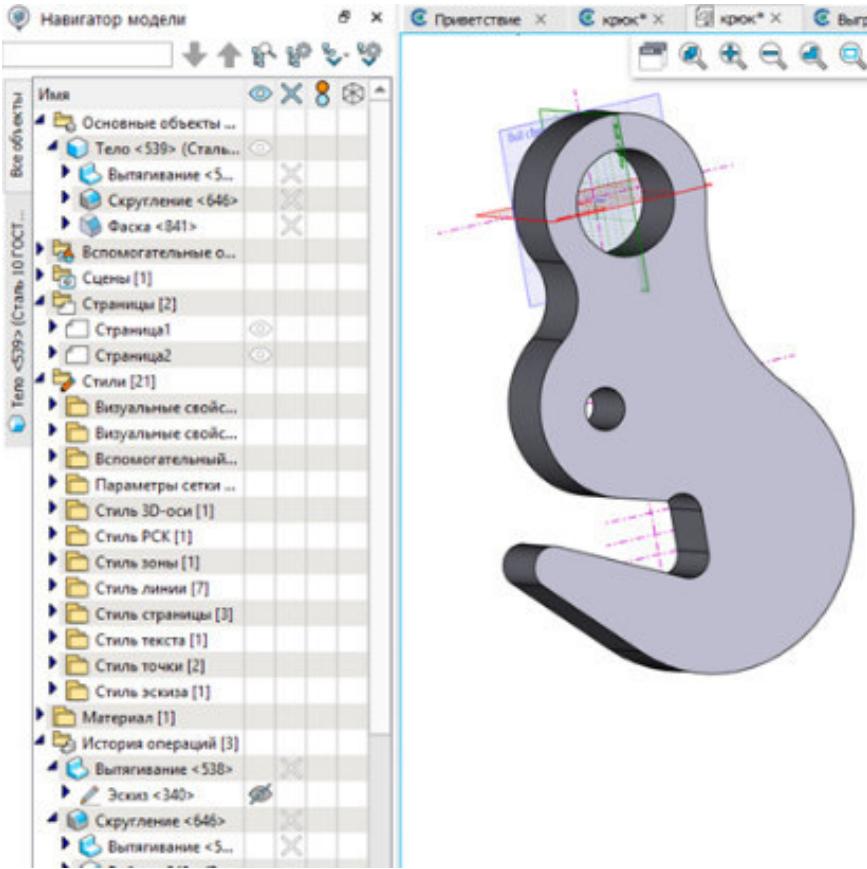


Рисунок 12. 3D-модель детали «Крюк чалочный» после выполнения операции «Выдавливания»

Для окончательного формирования 3D-модели необходимо выполнить операцию «Скругление». Ранее была проведена исследовательская работа в связи с проблемой построения скруглений в более ранних версиях «САРУС». Необходимо было проверить работоспособность ряда функций «Скругление» в СПЖЦ «САРУС», получившего сертификат САПР базового уровня. Был сделан вывод, что все алгоритмы, кроме управления опциями перекрытия скруглений – взаимной обрезки или сопряжения скруглений с наращиванием материала, оказались работоспособными [6], что было подтверждено выполнением операции при построении 3D-модели исходной детали.

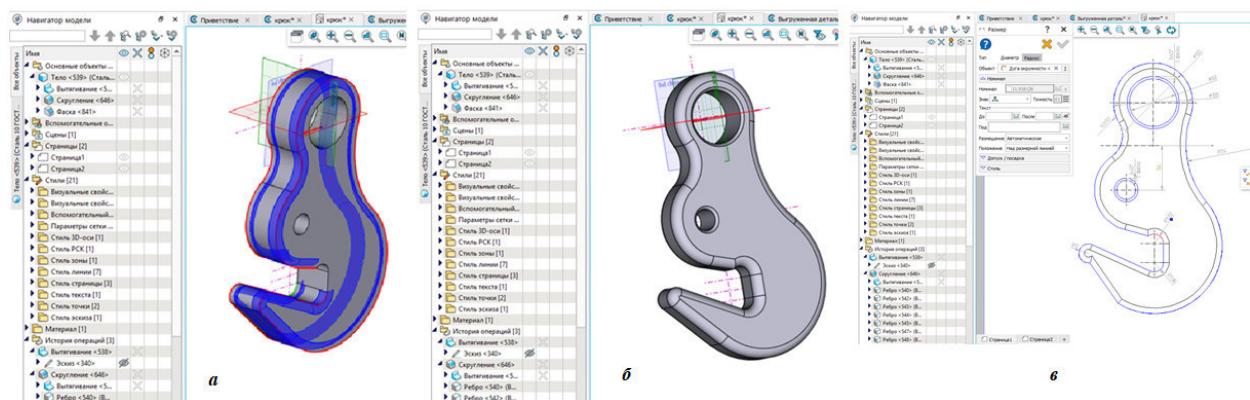


Рисунок 13. Окончание построения 3D-модели детали «Крюк чалочный»:
а – операция «Скругление»; б – окончательный вид модели; в – построение ассоциативного чертежа детали

В данном CAD очень удобно, что все ребра выделяются сразу по контуру (за исключением небольшого участка в глубине крюка). Не нужно нажимать на каждую дугу, чтобы реализовать операцию (рис. 13, а). После добавления фасок и скруглений деталь принимает внешний вид, показанный на рисунке 13, б.

Заканчиваем работу построением ассоциативного чертежа с простановкой размеров (рис. 13, в).

2. Построения детали «Крюк чалочный» в ПО «КОМПАС-3D»

Для проведения сравнительного анализа, запланированного в задачах, создадим 3D-модель детали «Крюк чалочный» в ПО «КОМПАС-3D», аналогичный исходному.

Этапы проектирования эскиза в программном обеспечении «КОМПАС» представлены на рисунке 14.

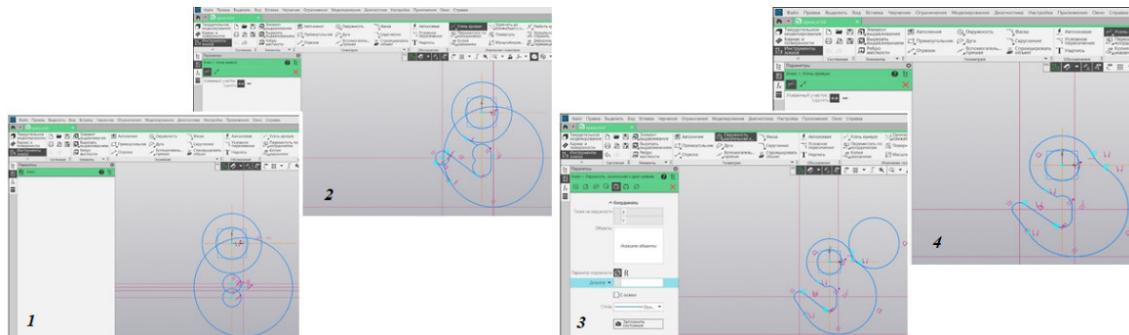


Рисунок 14. Этапы проектирования эскиза детали «Крюк чалочный» в ПО «КОМПАС-3D»

После построения эскиза в тот момент, когда необходимо было делать операцию «Выдавливание», в некоторых частях эскиза возникла ошибка, представленная на рисунке 15, а. Чтобы исправить эту ошибку пришлось уделить большое внимание просмотру всех стыков окружностей, всех соединений элементов. Это можно сделать вручную и потратить большое количество времени, а можно воспользоваться операцией «Проверка замкнутости» (рис. 15, б). При проверке были найдены незамкнутые контуры, представленные на рисунке 15, в. Стоит отметить, при проектировании в ПО «САРУС» таких проблем не возникло.

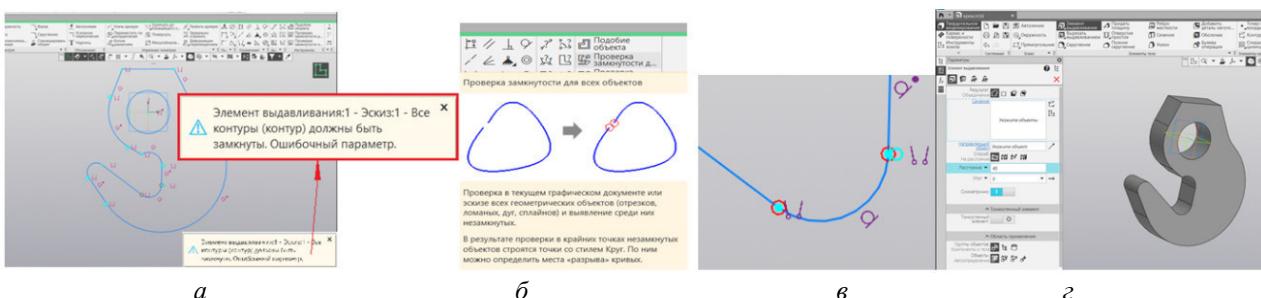


Рисунок 15. Выявление и исправление ошибки построения детали «Крюк чалочный» в ПО «КОМПАС-3D»:

- a – возникновение ошибки на этапе создания операции «Выдавливание»;*
- б – выполнение операции «Проверка замкнутости»;*
- в – выявление незамкнутых контуров;*
- г – 3D-модель детали после операции «Выдавливание» и исправления ошибок*

На заключительном этапе была применена операция «Скругления» (рис. 16, а). На этом этапе в ПО «КОМПАС» необходимо было выделить каждое ребро детали, что достаточно неудобно. В ПО «САРУС» такая операция применяется сразу для всех ребер. Окончательный вид детали «Крюк чалочный» показан на рисунке 16, б.

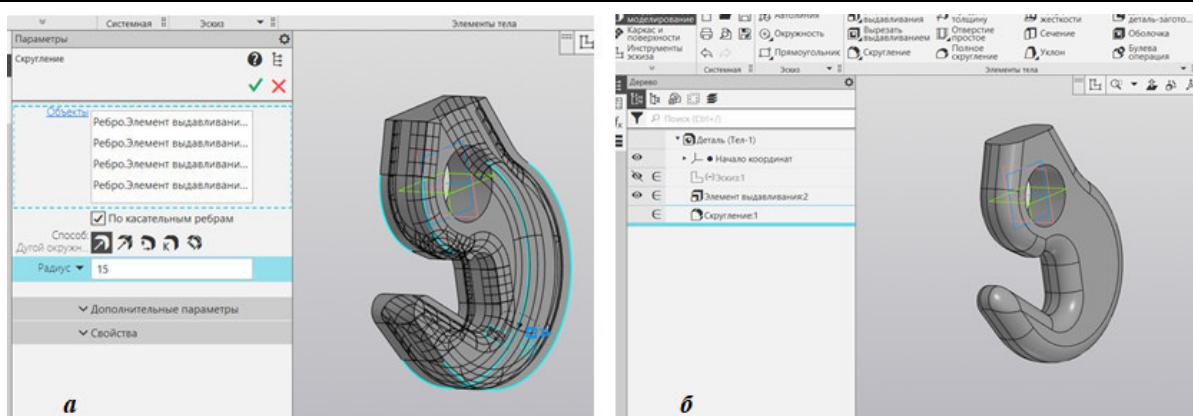


Рисунок 16. Окончание построения 3D-модели исходной детали:

a – применение операции «Скругление»; *б* – окончательный вид детали «Крюк чалочный»

Обсуждение результатов

При построении детали «Крюк чалочный» в КОМПАС-3D возникли некоторые сложности. Во-первых, здесь оказался менее удобным функционал для нахождения незамкнутых контуров. Также при построении скруглений в ПО «КОМПАС» необходимо было выбрать каждое ребро с двух сторон, что не очень удобно при построении, в тот момент как в СПЖЦ «САРУС» можно выбрать одну сторону, и выделение будет сразу на всем участке.

Это привело к заключению, что 3D-модель детали «Крюк чалочный» в СПЖЦ «САРУС» построилась более корректно, чем в КОМПАС-3D.

Заключение

Проведенное исследование показало, что функции группы «Ограничения» в САРУС эффективно срабатывают при выполнении задач по проектированию фасонных поверхностей. Основные результаты включают:

1. Эффективность реакции на изменения: при изменении значений параметров автоматически пересчитывались связанные с ними значения, что значительно упрощает процесс проектирования;
2. Поддержка сложных зависимостей: система позволяет учитывать как простые зависимости, так и более сложные логические условия, что повышает гибкость проектирования;
3. Выявление проблем: при тестировании были выявлены некоторые ограничения в реализации нескольких зависимостей одновременно, что требует доработки интерфейсов и алгоритмов.

Исследование работы функций группы «Ограничения» при построении фасонных поверхностей в системе проектирования жизненного цикла «САРУС» является важной задачей, поскольку эти функции позволяют контролировать процесс моделирования сложных геометрических форм.

Несмотря на существующие проблемы и вызовы, дальнейшее развитие и оптимизация этих функций могут привести к значительному улучшению процессов проектирования. Понимание и анализ срабатывания этих функций позволяет более эффективно управлять проектами и повышать качество конечных изделий. Будущие направления развития связаны с упрощением работы пользователей и оптимизацией ресурсов, что способно расширить применение ПО «САРУС» в промышленности.

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 В3 «САРУС».

Благодарность

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

Список литературы

1. Отчёт о НИР «Исследование цифровых технологий и возможностей их отраслевого применения, разработка и тестирование компонентов СПЖЦ V3» (Договор на выполнение НИР от 2 марта 2023 г. № 96-2023/203, Задача 10). Инв. номер НО/38-278.10-2023-О от 15.11.23. 2023. С. 64-88.
2. Отчет о научно-исследовательской работе исследование цифровых технологий и возможностей их отраслевого применения, разработка и тестирование компонентов СПЖЦ V3 (Договор на выполнение НИР от 2 марта 2023 г. № 96-2023/203, Задача 10). Инв. № НО/37-278.10-2023-О. 2024. С. 8–27.
3. Отчет о научно-исследовательской работе исследование цифровых технологий и возможностей их отраслевого применения, разработка и тестирование компонентов СПЖЦ V3 (Договор на выполнение НИР от 2 марта 2023 г. № 96-2023/203, Задача 10). Инв. № НО/37-278.10-2023-О. 2025. С. 10–38.
4. Словарь терминов по начертательной геометрии и инженерной графике / Новосиб. гос. аграр. ун-т, ИИ; сост. Т.В. Семенова, Г.А. Евдокимова, Е.В. Петрова. Новосибирск, 2010. 120 с. Режим доступа: <https://textarchive.ru/c-2996429-pall.html>
5. 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.
6. Самарина Е.А., Денисова Н.А. Исследование операции «Скругление» в программном обеспечении «Система полного жизненного цикла «САРУС» // GraphiCon 2024 : материалы 34-й Междунар. конф. по компьютерной графике и машинному зрению (Россия, Омск, 17–19 сент. 2024 г.). Омск : Изд-во ОмГТУ, 2024. С. 766–775.