

На правах рукописи

МАРТЫНОВА СВЕТЛАНА ВЛАДИМИРОВНА

**МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОСНАСТКИ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

Специальность: 05.13.12

«Системы автоматизации проектирования»
(авиационная и ракетно-космическая техника)

*Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук*

Москва – 2013

Работа выполнена на кафедре «Инженерная графика» в
Московском авиационном институте
(национальном исследовательском университете)

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Куприков Михаил Юрьевич**

Официальные оппоненты:

Долгов Олег Сергеевич

Доктор технических наук, доцент, Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет), профессор кафедры
«Проектирование специальных авиационных комплексов».

Викулин Юрий Юрьевич

Кандидат технических наук, Филиал ОАО "Компания "Сухой""ОКБ Сухого",
начальник отдела.

Ведущая организация: ОАО «Таганрогский авиационный научно-технический комплекс
им. Г.М. Бериева».

Защита состоится 19 июня 2013 г. в 10 часов на заседании
диссертационного совета Д212.125.13 Московского авиационного института
(национального исследовательского университета) «МАИ» по адресу:
125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, главный административный корпус,
зал заседания ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан «15» мая 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного Совета Д212.125.13
к.т.н., доцент

Маркин Леонид Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Тенденции развития авиации направлены на повышение эффективности авиационных комплексов. Для гражданской авиации одним из способов является увеличение топливной эффективности за счет влияния на аэродинамическое качество изделия. Это достигается путем использования комбинации сложных аэродинамических поверхностей, с определенным законом геометрической кривки по размаху, которая позволяет благоприятно изменить циркуляцию и приблизить ее к эллиптическому закону распределения. Внешняя поверхность, отвечающая таким требованиям, характеризуется сложной геометрической формой. Одним из способов реализации конструкций с такими поверхностями является использование композиционных материалов, сочетающих в себе низкий удельный вес и высокие прочностные характеристики.

Важной стадией производства изделий из композиционных материалов является создание технологической оснастки. При автоматизированном проектировании технологической оснастки используются математические модели процессов и объектов. Одной из базовых моделей является мастер-модель изделия, которая применяется при создании:

- эталона поверхности, например, при изготовлении элементов конструкции ЛА с базированием по внешней поверхности обшивки;
- технологической оснастки, например, при создании изделий из композиционных материалов (КМ) методом матриц;
- макета агрегата или изделия, единичного образца.

Задачу воспроизведения поверхностей исследовали: Ешеева И.Р., Осипов В.А., Злыгарев В.А., Давыдов Ю.В., Синицин С.А., Иванов Г.С., Роджерс Д., Адамс Дж.Б., Фокс А., Пратт, Phillips G. M., Taylor P. J., Watson G.A. В своих работах эти авторы рассматривают решение исключительно геометрической задачи формирования поверхности по известным сечениям без учета физико-механических характеристик материала и технологических особенностей изготовления оснастки. Задача формирования оснастки является обратной задачей, где исходными данными и критерием точности является «эталонная» поверхность.

Технологические аспекты формирования поверхности оснастки изложены в работах Сосова Н.Н., Смирнова О.И., Боголюбова В.С., Малышева Б.С.

Исследования в области каркасного представления поверхностей и проектирования оснастки ограничиваются либо общими правилами и подходами не позволяющими использовать их в автоматизированном процессе создания формообразующей оснастки, либо оформлены в виде специализированных программ, решающих отличные от создания формообразующей оснастки узкоспециализированные задачи.

Одним из наиболее распространенных инструментов автоматизированного проектирования оснастки являются системы геометрического моделирования (СГМ). Наличие большого числа

модулей, объединенных единой платформой системы геометрического моделирования, позволяет решать широкий спектр задач инженерного анализа, технологической подготовки производства, геометрического моделирования и электронного документооборота.

Особенностью применения СГМ в цикле подготовки производства является взаимосвязь технологии изготовления изделий и методов математического моделирования, реализованных в прикладных программных модулях. Повысить эффективность применения СГМ при автоматизации процессов технологической подготовки производства можно путем рационального использования экспертных систем, интегрированных в СГМ.

Вопросами использования экспертных систем в авиации и на стадии технологической подготовки производства ЛА занимались: Борцов Ю.А., Тонкий Л.В., Поезжалова С.Н., Васильев В. И., Жернаков С. В., Фрид А. И., Селиванов С.Г., Бородкина О.А., Кузнецова К.С., Митин И.А., Никулочкин М.Ю., Angus Cheung, W.H. Ip, Dawei Lu, B. W. J. Marx, D. P. Schrage, D. N. Mavris, Alsina J., Lischke M. P., Mayer K. L. Основными направлениями исследований являлись выбор технологического процесса, оптимизации предварительных проектов технологической документации, унификация аппаратуры, инструментов.

Существующие разработки решают отдельные вопросы производства, изготовления или проектирования ЛА, не охватывая процесс проектирования оснастки

Таким образом, возникает потребность в создании метода автоматизированного проектирования формообразующей оснастки, на базе взаимодействия экспертной системы, позволяющей учесть множество неформализуемых параметров, и модуля, использующего возможности и математический аппарат СГМ.

Теоретической и методологической базой исследования стали фундаментальные труды в области экспертных систем Р. Форсайта, Д. Джаррано, Г. Райли, А. П. Частикова, Т. А. Гаврилова, Д.Л. Белова, К. Нейлора и др.

Целью работы разработать научно-методическое и программное обеспечение для анализа проектных и технологических решений при проектировании формообразующей оснастки объектов авиационной техники в системе геометрического моделирования с использованием экспертной системы.

Внедрение методик, изложенных в работе, в процесс разработки позволяет повысить качество проектно-конструкторских работ за счет автоматизации типовых процессов проектирования. Это приведет к уменьшению сроков проектирования и, как следствие, к сокращению затрат (материальных, временных и пр.).

Поставленная цель диссертационной работы достигается путем решения следующих задач:

- определения места и состава задач проектирования формообразующей оснастки в процессе создания летательного аппарата;

- анализа научно-методического обеспечения и экспертных систем для проектирования оснастки объектов авиационной техники;
- разработки методик и алгоритмов по формированию математической модели оснастки с использованием экспертной системы;
- программной реализации научно-методического обеспечения;
- проведения на основе разработанного программного обеспечения проектных исследований;
- выявление проектных рекомендаций и создание образцов элементов конструкции легкого самолета.

Методика исследования

Объектом исследования является формообразующая оснастка.

Предметом исследования является автоматизация процесса проектирования формообразующей оснастки. Декомпозиция, разработка математических моделей и алгоритмов основываются на парадигме системного подхода.

Определение оптимальных или условно оптимальных конструктивно-компоновочных решений осуществлено на основе математического моделирования с использованием формально-эвристических процедур. Задача может быть решена методами многопараметрической дискретной оптимизации.

Научная новизна диссертации заключается в разработке комплекса формально-эвристических методов, моделей, алгоритмов и процедур решения задачи создания формообразующей оснастки на базе виртуальных моделей, основанного на разработанном методе автоматизированного проектирования формообразующей оснастки объектов авиационной техники.

В ходе работы были получены следующие результаты:

- выявлены особенности создания формообразующей оснастки на примере самолета исходя из технологических и геометрических требований;
- разработан, основанный на формально-эвристическом моделировании, метод автоматизации проектирования формообразующей оснастки;
- разработаны математические модели формообразующей оснастки;
- создана база знаний, используемая при проектировании формообразующей оснастки;
- выявлены закономерности между параметрами математической модели элементов каркаса и характеристиками оснастки;
- определена область существования метода автоматизированного проектирования формообразующей оснастки.

Практическая ценность диссертационной работы.

Разработанный метод автоматизации проектирования формообразующей оснастки, математические модели технологических процессов, а также алгоритмы, процедуры и целевые функции, базы данных и база знаний использованы соискателем в системе автоматизации проектирования формообразующей оснастки изделий авиационной техники FORMOS.

Результаты работы могут быть использованы в НИИ и ОКБ авиационной промышленности при разработке комплексных систем автоматизированного проектирования и при подготовке специалистов в авиационных учебных заведениях.

Принципы макетирования могут применяться в ОКБ авиационной промышленности при изготовлении моделей ЛА, технологической оснастки, макетов, иллюстрирующих концепцию будущего изделия. Возможно использование разработанной концепции автоматизированного проектирования формообразующей оснастки элементов авиационной техники и сложившихся подходов при подготовке специалистов по специальности 05.13.12 «Системы автоматизации проектирования».

Достоверность результатов обеспечивается тестированием метода проектирования формообразующей оснастки элементов авиационной техники при создании мастер-модели легкого самолета в полноразмерном варианте и в масштабе 1:4. Отклонение характеристик физических и математических моделей не превышает 5%. Система соответствует заданным техническим требованиям и обеспечивает получение результатов в соответствии с ГОСТ 17228-87.

Внедрение результатов работы

Разработанный метод проектирования формообразующей оснастки элементов авиационной техники и программный модуль FORMOS внедрены в ОАО "Московский машиностроительный экспериментальный завод – композиционные технологии" (ОАО "ММЭЗ-КТ), кафедре 904 «Инженерная графика» МАИ.

Апробация работы. Результаты исследований выносились на обсуждение на следующих научно-технических конференциях:

Год	Организация	Наименование конференции, семинара и т.д.
2006	Московский институт электроники и информатики	XIV-я международная студенческая школа-семинар «Новые информационные технологии»
2007	Севастопольский национальный технический университет	IX Международной студенческой научно-технической конференции «Графика XXI века»
2007	Севастопольский национальный технический университет	X Международной студенческой научно-технической конференции «Графика XXI века»
2007	ГОУ ВПО Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)	Всероссийский смотр-конкурс научно-технического творчества студентов высших учебных заведений «Эврика 2007»

2007	Московский Авиационный Институт (национальный исследовательский университет)	4 Всероссийская конференция студентов, аспирантов и молодых ученых
2007	Научно-исследовательский центр автоматизированных систем	Всероссийский конкурс «Компьютерный инжиниринг»
2008	Московский государственный университет печати	Окружного конкурса студенческих научных работ вузов Северного административного округа г. Москвы
2008	Московский Авиационный Институт (национальный исследовательский университет)	Всероссийская студенческая научно-техническая школа-семинар «Аэрокосмическая декада»
2008	Союз Машиностроителей России	Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России»
2010	Таганрогский технологический институт Южного федерального университета	VIII Всероссийская научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов "Информационные технологии, системный анализ и управление"
2010	Центр Развития Научного Сотрудничества	IV Международная студенческая научно-практическая конференция Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания
2010	Юго-Западный государственный университет	Международная научно-практическая конференция Применение инновационных технологий в научных исследованиях
2010	Institute of Aeronautics & Applied Mechanics Faculty of Power & Aeronautical Engineering Warsaw University of Technology	Nineth International Seminar READ 2010
2011	Московский государственный технический университет гражданской авиации	Международная научно техническая конференция, посвященная 40-летию образования МГТУ ГА «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества»
2012	Ульяновское высшее авиационное училище гражданской авиации (института)	Международная молодежная научная конференция «Гражданская авиация: 21 век»
2012	Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского	XXXVIII Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения»
2012	Московский Авиационный Институт (национальный исследовательский университет)	Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2012»

Основные теоретические положения и некоторые результаты исследования опубликованы автором в научных статьях [1-4, 6], а также содержатся в тезисах докладов [5, 7-19] на научно-технических конференциях всероссийского и международного значения.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения, библиографического списка (143 работы отечественных и зарубежных авторов) и приложения. Общий объем диссертации – 152 страницы, включая – 14 таблиц и 76 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении анализируется проблема автоматизации этапа технологической подготовки производства при создании формообразующей оснастки элементов авиационной техники, сформулирована цель исследования, дана общая характеристика работы.

Первая глава структурно состоит из пяти частей. *Первая часть* посвящена определению области исследования. Рассмотрена актуальность вопроса создания формообразующей оснастки в композитном производстве. Использование композиционных материалов в конструкции летательных аппаратов является одним из перспективных направлений развития авиации. КМ используются не только при создании интерьеров, обтекателей, зализов, но и в основной конструктивно-силовой схеме крыльев, фюзеляжа, механизации и т.д. (рис. 1).

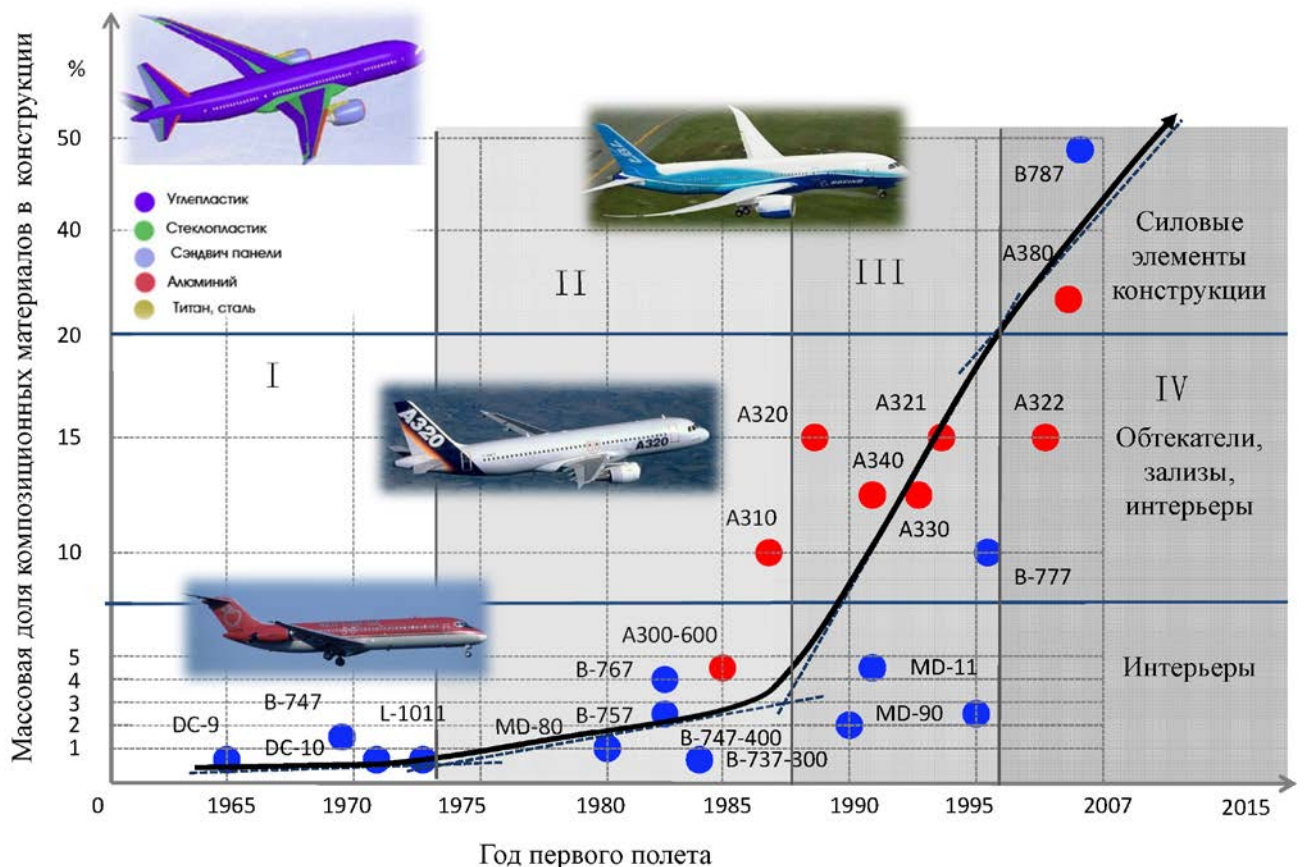


Рисунок 1 – Использование композитных материалов в конструкции самолета

Определено место проектирования оснастки на этапе ЖЦ изделия из КМ (рис. 2). Выделен класс самолетов, на которые ориентирован метод автоматизированного проектирования формообразующей оснастки.

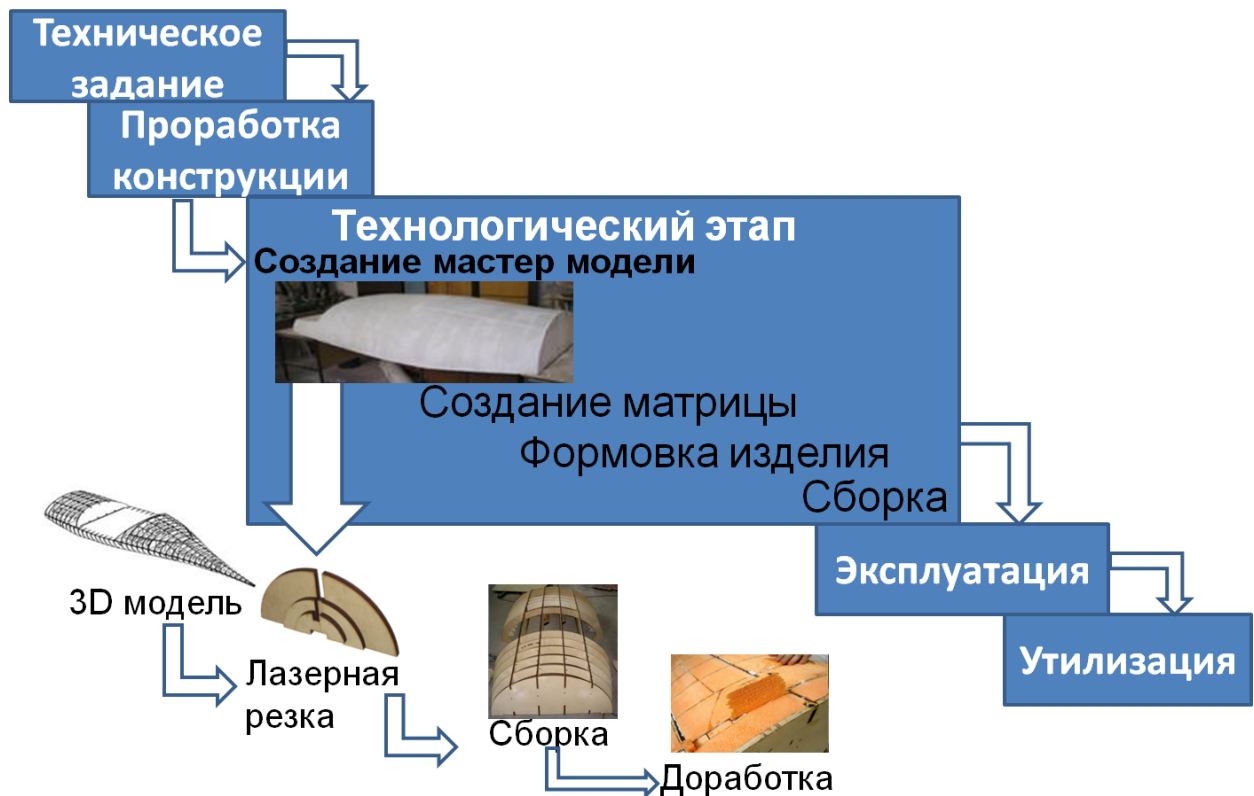


Рисунок 2 – Упрощенная схема процесса изготовления изделия из композиционных материалов

Вторая часть посвящена анализу методов проектирования и изготовления формообразующей оснастки. Приведены особенности применения плазово-шаблонного метода и технологий быстрого прототипирования. Выявлены их преимущества и недостатки. Изложены основные подходы к проектированию оснастки и каркасных поверхностей. Приведен краткий обзор работ Российских и зарубежных авторов в данной области.

Третья часть содержит анализ СГМ с точки зрения критериев автоматизации проектирования формообразующей оснастки и работы с экспертной системой.

Выявлено, что в существующем виде, без дополнительной доработки, рассмотренные системы сложно применять для автоматизированного проектирования формообразующей оснастки.

Четвертая часть посвящена исследованию применения экспертных систем в авиации. На этапе технологической подготовки производства экспертные системы используются для формирования маршрутных карт, техпроцессов, разработки стратегии обработки деталей. Рассмотренные экспертные системы не имели базы знаний и набора правил, позволяющих проектировать формообразующую каркасную оснастку.

В *пятой части* первой главы обоснована актуальность создания метода автоматизированного проектирования формообразующей оснастки объектов авиационной техники.

Сформулирована основная цель исследования:

разработать научно-методическое и программное обеспечение для анализа проектных и технологических решений при проектировании формообразующей оснастки объектов авиационной техники с использованием программы геометрического моделирования и экспертной системы.

В математической форме задачу исследования можно сформулировать как задачу многокритериальной дискретной оптимизации:

$$\begin{aligned} N^* &= \text{ArgMin } N(p; u) \\ p &\in P \\ u &\in U \end{aligned} \quad (1)$$

где N^* – условно оптимальное количество элементов в оснастке;
 $N(p; u)$ – однозначная и целочисленная функция;
 P – вектор параметров;
 U – вектор ограничений.

$$P = P(T; M; S) \quad (2)$$

где T – шаг элементов, мм;
 M – материал;
 S – исходная поверхность.

$$U = U(\delta; \sigma; H; B; v; w) \quad (3)$$

где δ – ограничение по допустимой погрешности, мм;
 σ – допускаемые напряжения, МПа;
 $H; B$ – габаритные размеры материала заготовки, мм;
 $v; w$ – направления шага элементов.

$$M = M(\gamma; \Delta; \varepsilon; E_{атм}; \sigma_\varepsilon) \quad (4)$$

где γ – удельный вес, Н/м³;
 Δ – погрешность материала, мм;
 ε – модуль упругости, МПа;
 $E_{атм}$ – атмосферные деформации, %;
 σ_ε – предел прочности, МПа.

$$S = S(x; y; z) \quad (5)$$

где $x; y; z$ – координаты исходной поверхности.

Оптимизация проводится по критерию минимизации количества элементов каркаса формообразующей оснастки.

Вторая глава состоит из семи частей и посвящена методу автоматизированного проектирования формообразующей оснастки элементов авиационной техники с использованием экспертной системы.

В *первой части* изложен метод автоматизированного проектирования формообразующей оснастки

Во *второй части* рассматриваются основные математические модели, используемые в методе: модель каркасной оснастки, ограничения, накладываемые на математическую модель оснастки.

В общем виде математическую модель оснастки можно представить в виде системы уравнений (2), описывающей совокупность математических моделей оснастки (рис. 3).

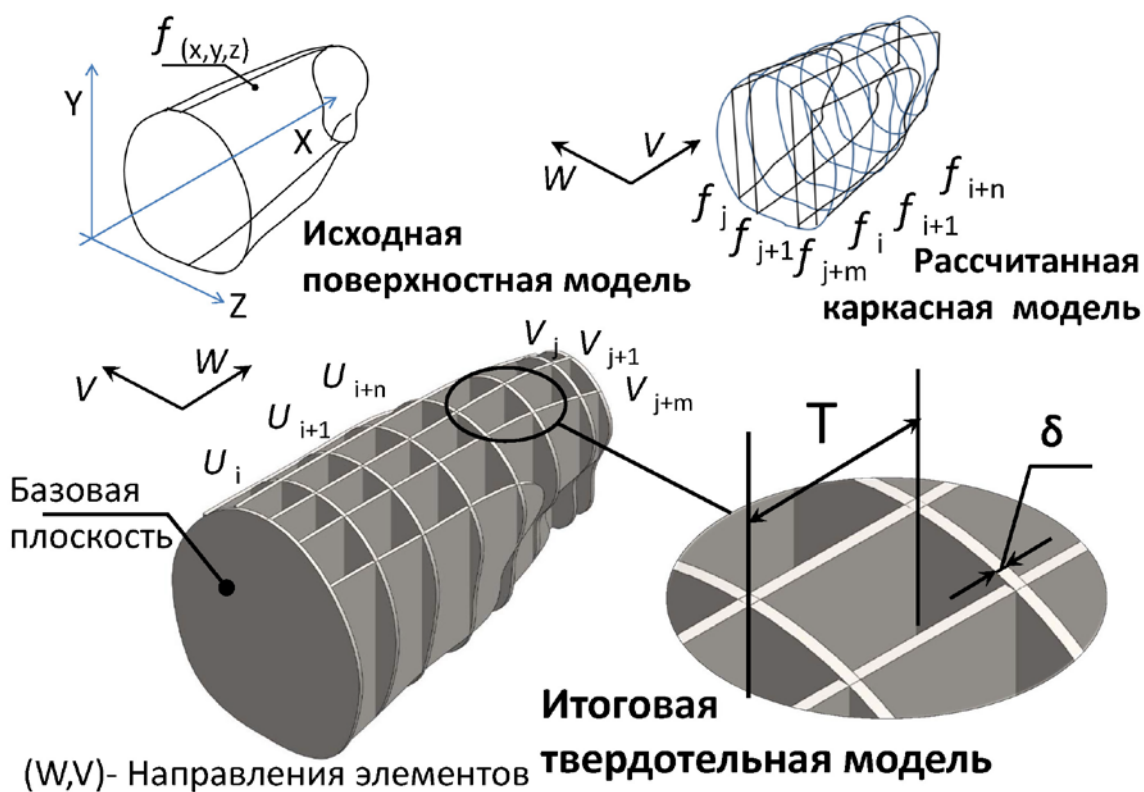


Рисунок 3 – Математические модели оснастки

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1 = T_1(\omega) \\ \omega = \omega(y) \\ T_2 = T_2(\omega) \\ \varepsilon = \varepsilon(z) \\ Y \leq Y_{\max} \\ Z \leq Z_{\max} \\ M = M(\gamma, \Delta, \varepsilon, E_{атм}, \sigma_6) \\ O = O(k_{инстр}, k_{итер}, k_{сн}) \end{array} \right. \quad (6)$$

где T_1 – шаг элементов каркаса вдоль направления ω ;

T_2 – шаг элементов каркаса вдоль направления ε ;

ω – функция, описывающая поверхность изделия в направлении y ;

ε – функция, описывающая поверхность изделия в направлении z ;

X, Y – координаты сечения в локальной системе координат;

X_{\max}, Y_{\max} – максимально допустимое отклонение поверхности;

M – модель материала;

γ – удельный вес, Н/м³;

Δ – погрешность материала, мм;

E – модуль упругости, МПа;

$E_{атм}$ – атмосферные деформации, %;

σ_ε – предел прочности, МПа;

O – модель обработки внешней поверхности оснастки;

$k_{инстр}$ – коэффициент инструмента обработки внешней поверхности оснастки;

$k_{итер}$ – коэффициент итераций обработки внешней поверхности оснастки;

$k_{сн}$ – коэффициент инструмента обработки внешней поверхности оснастки.

Результатом расчета геометрического шага является значение шага элементов каркаса в первом приближении. Расчет производится путем разбиения исходной поверхности на сегменты и анализа кривой в двух направлениях на наличие отклонения кривой контура от аппроксимирующих прямых.

Определение геометрического шага проводится по формулам (7-11)

$$\begin{cases} Y_n - Y_{n-1} = T, \\ Z_n - Z_{n-1} = T \end{cases} \quad (7)$$

при $Y_{\max} \leq Y_{дон}$ и $Z_{\max} \leq Z_{дон}$.

$$\begin{cases} Y_n - Y_{n-1} = \frac{T}{2}, \\ Z_n - Z_{n-1} = \frac{T}{2} \end{cases} \quad (8)$$

при $Y_{\max} \geq Y_{дон}$ и $Z_{\max} \leq Z_{дон}$.

$$\begin{cases} Y_n - Y_{n-1} = T, \\ Z_n - Z_{n-1} = \frac{T}{2} \end{cases} \quad (9)$$

при $Y_{\max} \leq Y_{\text{доп}}$ и $Z_{\max} \geq Z_{\text{доп}}$.

$$\begin{cases} Y_n - Y_{n-1} = \frac{T}{2}, \\ Z_n - Z_{n-1} = \frac{T}{2} \end{cases} \quad (10)$$

при $Y_{\max} \geq Y_{\text{доп}}$ и $Z_{\max} \geq Z_{\text{доп}}$.

где Y_n, Y_{n-1} – координаты n -го элемента оснастки в продольном направлении;

Z_n, Z_{n-1} – координаты n -го элемента оснастки в поперечном направлении;

T – шаг элементов оснастки в первом приближении;

Y_{\max}, Z_{\max} – максимальное отклонение точек образующей (направляющей) от оси локальной системы координат;

$Y_{\text{доп}}, Z_{\text{доп}}$ – допустимая погрешность.

Расчет геометрического шага проводится итерационно в двух направлениях Y и Z до момента выполнения условия (11).

$$\begin{cases} Y_{\max} \leq Y_{\text{доп}}, \\ Z_{\max} \leq Z_{\text{доп}} \end{cases} \quad (11)$$

В третьей части представлена математическая модель базы материалов, перечислены критерии выбора оптимального расположения элементов каркаса и основные параметры оснастки.

Для описания свойств заготовки введено понятие модели заготовки, описываемое параметрами (12).

$$M = M(K_K, K_T, K_{\text{Э}}), \quad (12)$$

где K_K – совокупность конструкционных параметров;

K_T – совокупность технологических параметров;

$K_{\text{Э}}$ – совокупность экономических параметров.

Четвертая часть содержит описание алгоритма расчета НДС методом конечных элементов.

В пятой части представлены исследования по математическому моделированию процессов доработки поверхности различными способами:

- 1) фрезерная обработка на станке с ЧПУ;
- 2) заполнение пространства между элементами материалом (пенопласт, пенополиуретан, и т.д.) и дальнейшая доработка поверхности;
- 3) обтяжка каркаса элементов различными гибкими материалами (фанера, термоусадочная пленка, текстолит, силиконовая оправка).

Шестая часть содержит схему расчета итоговой прогнозируемой точности изделия

$$\Delta = \Delta_{\text{воспр}} + \Delta_{\text{рез}} + \Delta_{\text{матер}} + \Delta_{\text{техн}}, \quad (13)$$

где $\Delta_{\text{воспр}}$ – погрешность воспроизведения;

$\Delta_{\text{рез}}$ – погрешность лазерной резки (исходные данные);

$\Delta_{\text{матер}}$ – погрешность материала (исходные данные);

$\Delta_{\text{техн}}$ – погрешность сборки и итоговой обработки агрегата.

Седьмая часть описывает экспертную систему.

Для обеспечения единого информационного пространства, а также для определения оптимальных параметров разрабатываемой формообразующей оснастки (при использовании различных классов моделей) используется экспертная система FORMOS.

Структурно ЭС FORMOS состоит из следующих частей:

- анализа геометрической твердотельной или поверхностной модели;
- проектирования формообразующей оснастки;
- пополняемой и редактируемой базы материалов-заготовок.

Модуль анализа геометрии позволяет подготовить геометрическую модель для последующего расчета. ЭС ориентирована на специалиста, который не имеет углубленных знаний в СГМ. Система позволяет проанализировать исходную поверхностную или твердотельную модель на отсутствие разрывов между гранями, многотельность (для твердотельной модели), непрерывность касательности по границам граней, наличие «карманов». В случае выполнения всех условий, в результате будет получена геометрическая модель поверхности моделируемого объекта. Пример, правила ПР2* приведен на рисунке 4.

ЕСЛИ расстояние_между_гранями>допуск1

И расстояние_между_гранями<допуск2

ТО диалог(«В автоматическом режиме произвести сшивку поверхностей?»)

// «модуль сшивка поверхностей»

ЕСЛИ диалог(«В автоматическом режиме произвести сшивку поверхностей?») ДА

ТО набор_функций_SW_1

ЕСЛИ диалог(«В автоматическом режиме произвести сшивку поверхностей?») НЕТ

ТО вызов_функция_SW_2

Рисунок 4 – Фрагмент блока правил ПР2*

Модуль проектирования оснастки содержит 40 правил и позволяет определять оптимальный шаг силовых элементов конструкции при заданных ограничениях. Экспертная система предлагает пользователю различные варианты типоразмеров заготовок для изготовления силового набора, схемы расположения элементов, инструменты получения внешней поверхности.

Модуль анализа результатов позволяет оценить точность полученной итоговой поверхности. В случае положительного решения, система подготавливает выходные данные, формирует отчет по проведенным рассуждениям. Если точность поверхности не удовлетворяет пользователя, то система предлагает уточнить проектные параметры, а если цель опять не достигнута, изменить стратегию формирования каркаса оснастки.

Результатом главы является алгоритм создания формообразующей оснастки в системе FORMOS (рис. 5).



Рисунок 5 – Алгоритм работы системы FORMOS

Третья глава посвящена описанию основных возможностей и принципов работы созданной соискателем автоматической системы проектирования формообразующей оснастки элементов авиационной техники.

Программа, получившая название FORMOS, предназначена для проектирования формообразующей оснастки, разработки каркаса и нахождения расстояния между элементами, прогнозирования характеристик оснастки на этапе технологической подготовки производства.

Система позволяет:

- сократить время и повысить качество работы технологи на этапе технологической подготовки производства;
- провести анализ 3D модели объекта или его частей;
- рассчитать схему расположения элементов каркаса для различных материалов и провести сравнение вариантов исполнения каркаса;
- провести анализ напряженно-деформированного состояния элементов (деталей, узлов и агрегатов) оснастки;
- выбрать метод получения внешней поверхности;
- проводить подготовку специалистов в высших учебных заведениях.

В основе FORMOS лежит производственная экспертная система, расчетный блок и интерфейс, интегрированный в СГМ. Программа FORMOS состоит из пяти модулей:

- базы данных;
- базы знаний;
- препроцессора;
- решателя;
- постпроцессора.

Блок-схема программы представлена на рисунке 6.

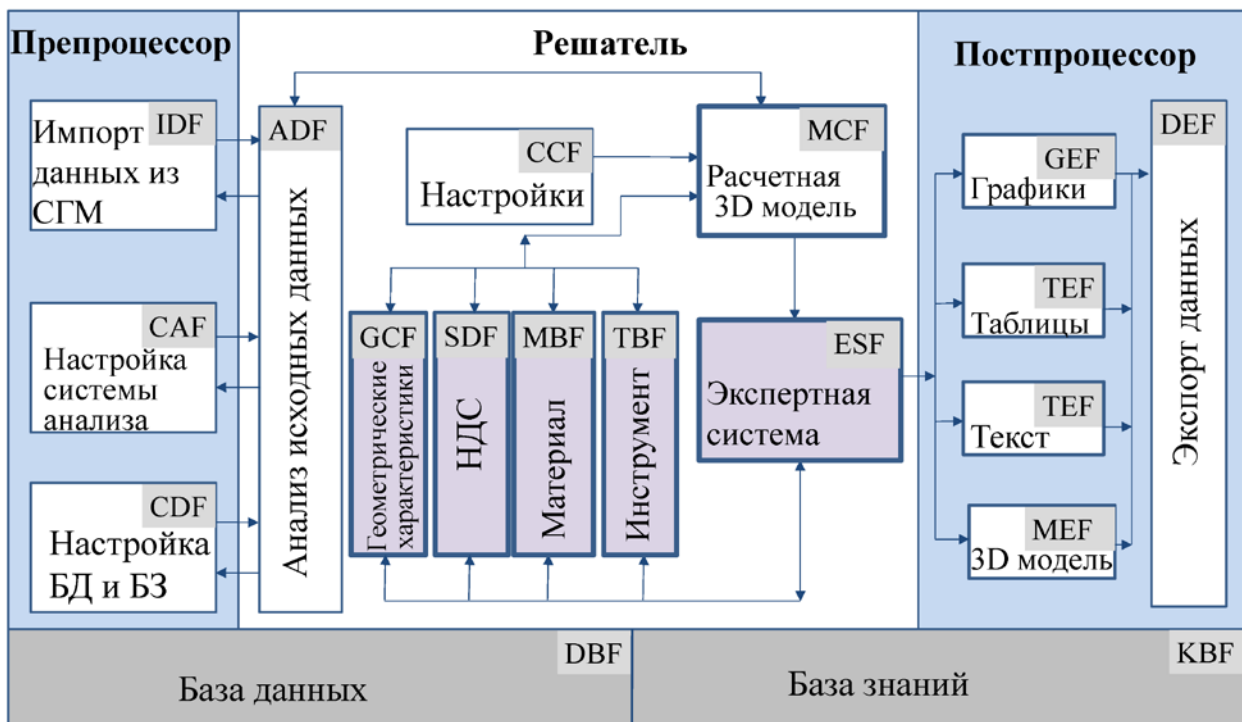


Рисунок 6 – Функциональные модули системы FORMOS

Основные характеристики системы FORMOS приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры программного комплекса FORMOS

Наименование параметра	Значение
Формат входных данных	prt, iges, txt, stp
Направление расположения элементов	2 ортогональных плоскости
Тип рабочей геометрии	Твердотельная модель, замкнутая поверхность
Максимальная точность математической модели	$1 \cdot 10^{-4}$ мм
Количество материалов в базе данных	120
Количество правил в экспертной системе	40
Количество инструментов в базе	4
Формат выходных данных	prt, iges, txt, stp

Работа в модуле осуществляется в диалоговом режиме, пользователь последовательно выбирает параметры оснастки в порядке, регламентированном экспертной системой. Интерфейс FORMOS представляет собой окно в СГМ, содержащее поля ввода и вывода данных (рис. 7).

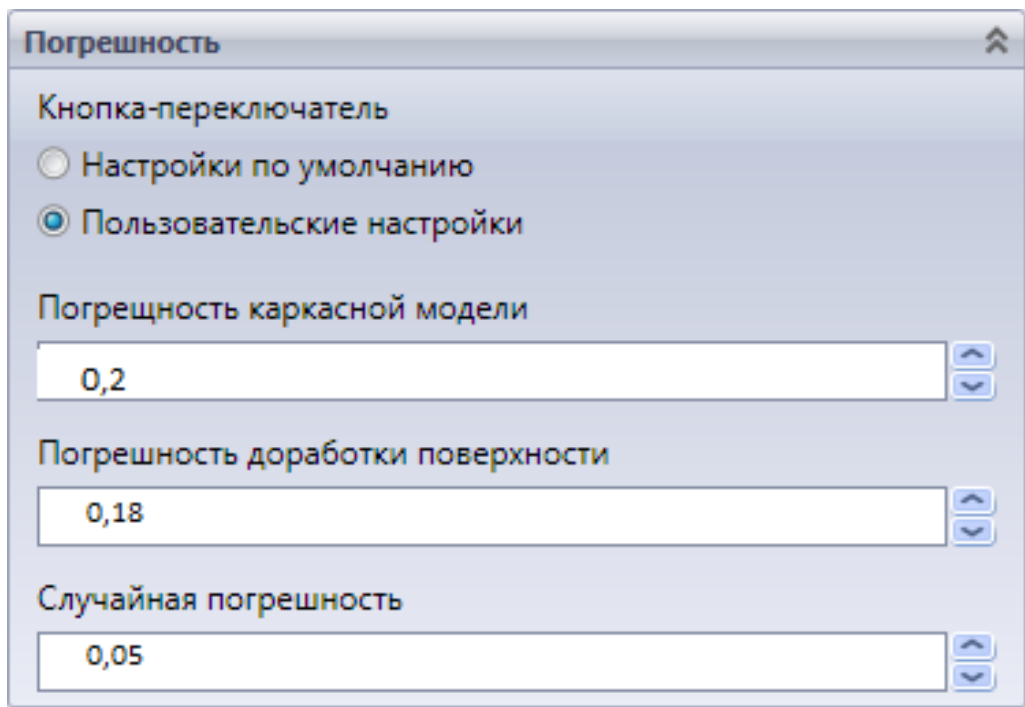


Рисунок 7 – Интерфейс программного комплекса FORMOS

В четвертой главе проводятся проектные исследования с помощью модуля автоматизированного проектирования на основе экспертной системы и подтверждение адекватности расчетной математической модели оснастки объектов авиационной техники (рис. 8).

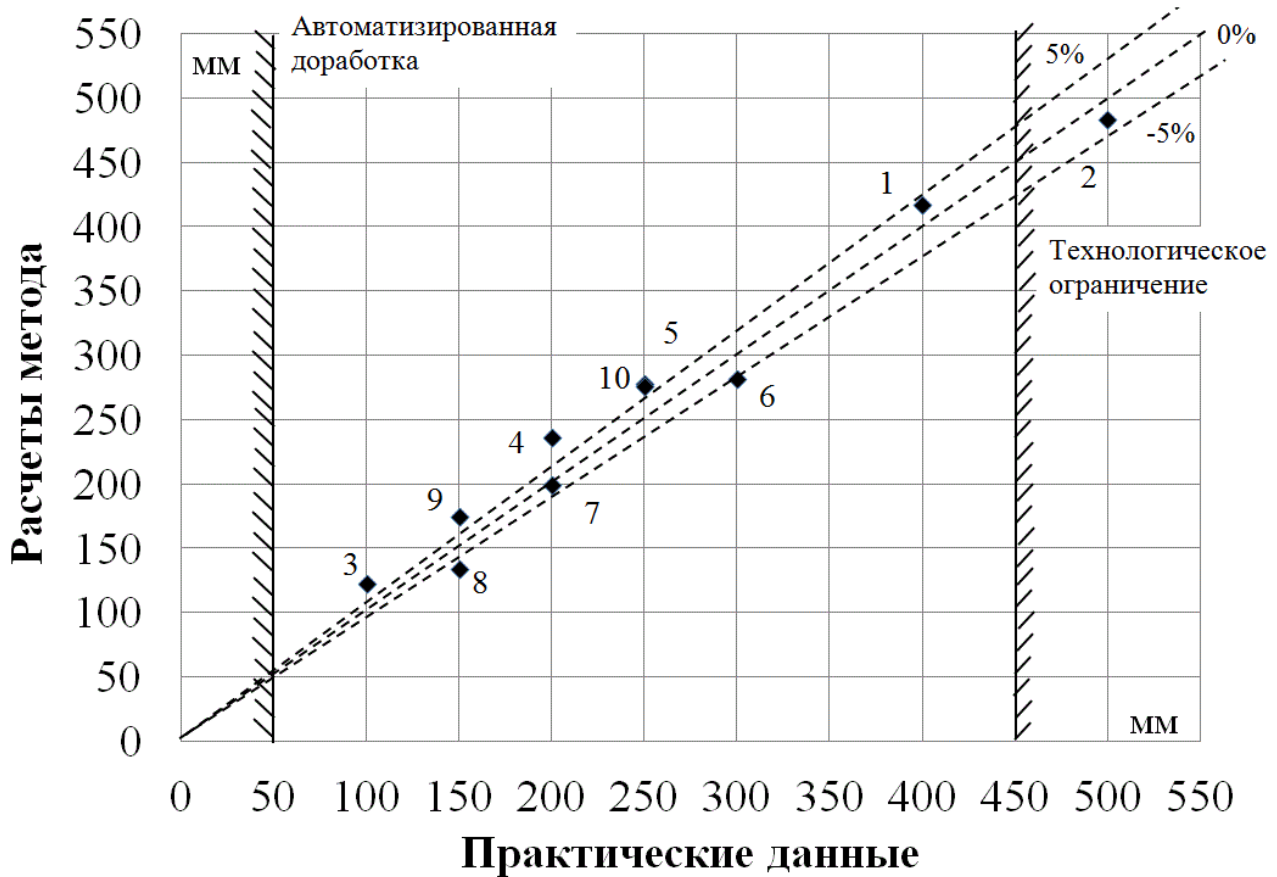


Рисунок 8 – Результаты исследований

Проектные исследования были проведены на фюзеляже легкого многоцелевого самолета. Были получены значения шагов элементов каркаса, сформулированы рекомендации по выбору материала и методу черновой и чистовой доработки. Результаты представлены на рисунках 9-10.

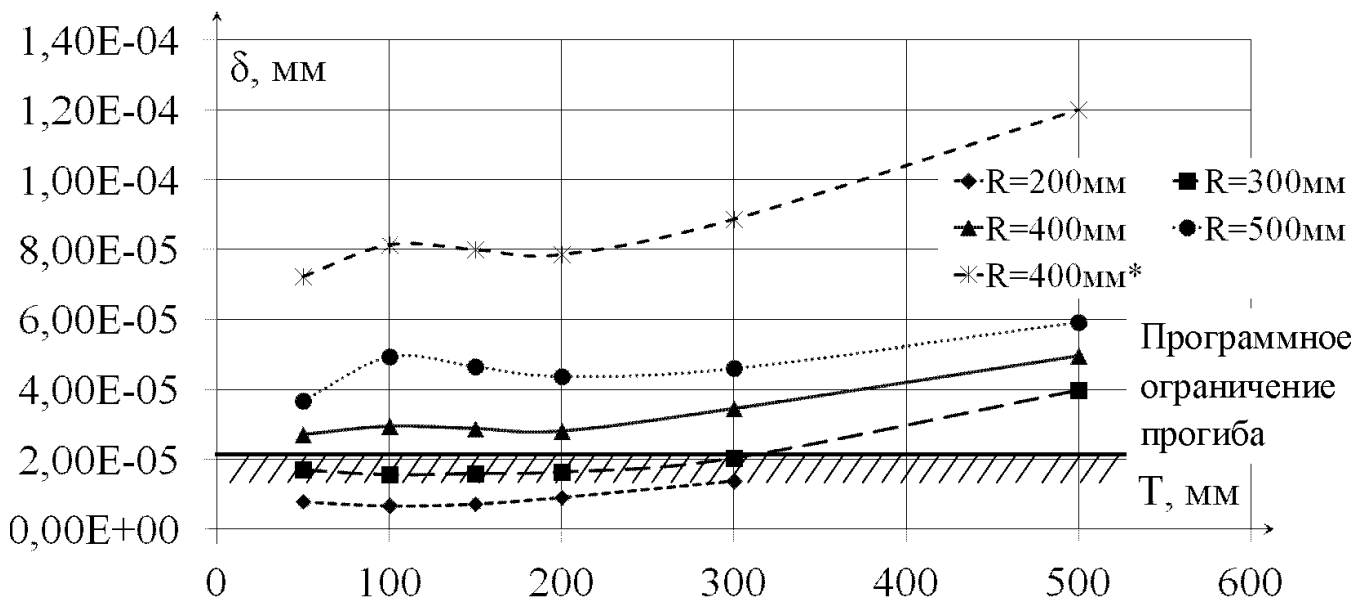


Рисунок 9 – Результаты исследований

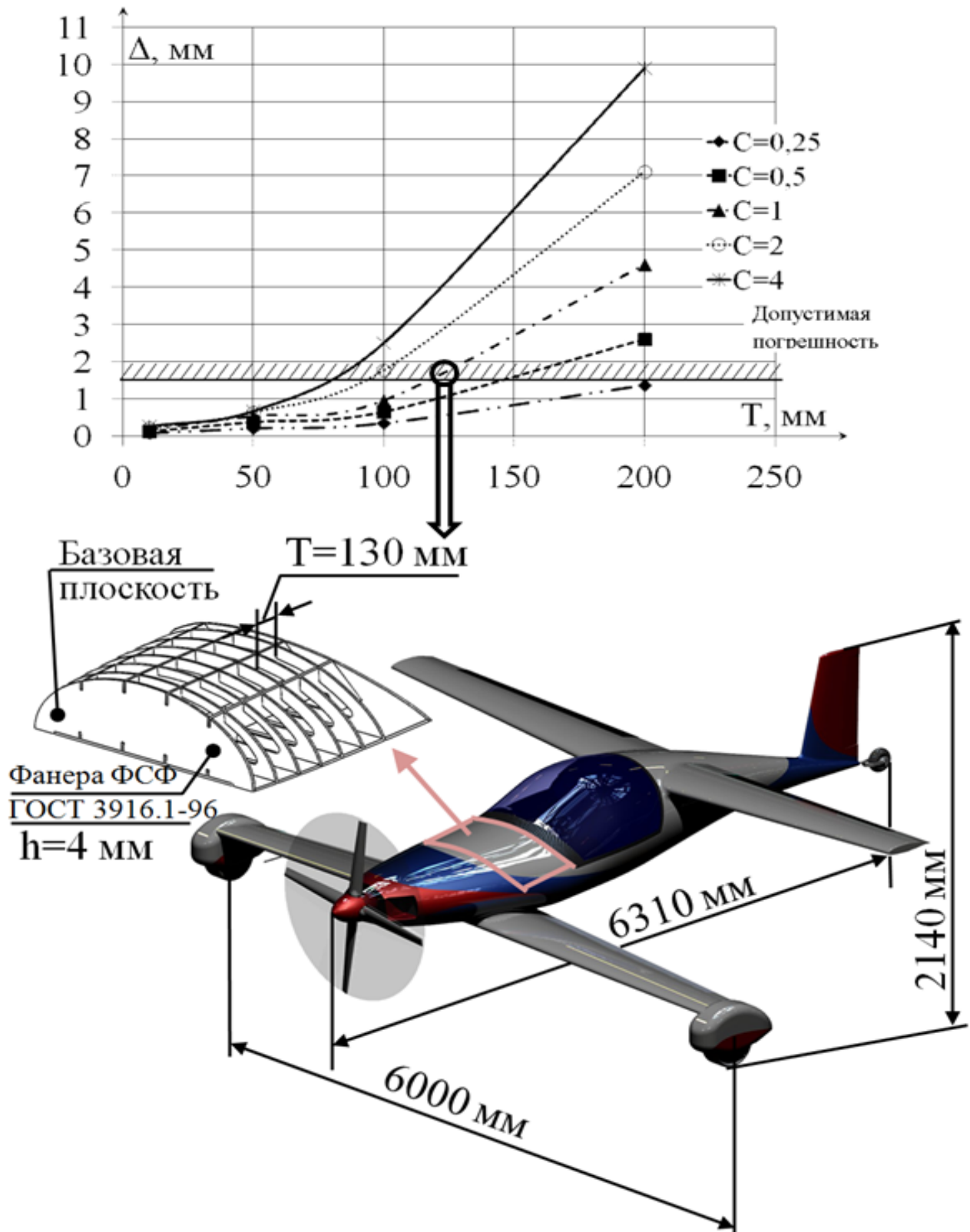


Рисунок 10 – Результаты проектных исследований легкого самолета $m_o = 700$ кг

В процессе проектных исследований было проведено сравнение конструкции 10 образцов оснастки выполненных без применения модуля FORMOS с конструкцией оснастки этих же образцов, но рассчитанных разработанным методом в автоматизированном модуле. Сравнение показало, что в большинстве случаев шаг элементов был выбран менее, чем требовалось по прочностным и точностным критериям, что приводило к увеличению массы, количества элементов конструкции, повышению трудоемкости доработки и стоимости оснастки.

ВЫВОДЫ

Разработанный метод автоматизированного проектирования формообразующей оснастки элементов авиационной техники заключается в интеграции системы геометрического моделирования и экспертной системы. Метод позволяет сократить затраты и повысить качество проектно-конструкторских работ за счет автоматизации процесса определения параметров оснастки и создания электронного макета оснастки.

1. Созданная система FORMOS, основанная на экспертной системе и имеющая модуль, интегрированный в СГМ SolidWorks, позволяет в автоматизированном режиме проводить анализ геометрии, проектирование и выбор оптимальных параметров конструктивно-силовой схемы оснастки, формировать рекомендации по проектированию оснастки.
2. В процессе параметрических исследований определен оптимальный шаг размещения силовых элементов оснастки

$$200 < T \leq 250 \text{ мм} \quad \text{для} \quad D = 550 \text{ мм} \quad L = 2500 \text{ мм} \quad \rho = 0,025 \text{ мм}^{-1}$$

$$250 < T \leq 300 \text{ мм} \quad \text{для} \quad D = 550 \text{ мм} \quad L > 3500 \text{ мм} \quad \rho = 0,015 \text{ мм}^{-1}$$

$$300 < T \leq 350 \text{ мм} \quad \text{для} \quad D = 700 \text{ мм} \quad L = 2500 \text{ мм} \quad \rho = 0,025 \text{ мм}^{-1}$$

3. Анализ результатов напряженно-деформированного состояния, проведенный с помощью системы конечно-элементного анализа COSMOSWorks, показывает, что транспортировочные и сборочные нагрузки оказывают слабое влияние на выбранную КСС оснастки. Напряжения для изделия с габаритными размерами 2500x5000 мм составляют $\sigma \leq 80$ МПа.
4. В ходе проектных исследований выбраны типовые стратегии черновой обработки для различных типов поверхностей и КСС оснастки. При использовании схемы «шпангоут+заполнитель» рационально использовать пенопласт в качестве заполнителя и обработку струной для $D=550$ мм, $L=2500$ мм, $\rho=0,025$ мм⁻¹, и $D=550$ мм, $L>3500$ мм, $\rho=0,015$ мм⁻¹. При малых шагах $T \approx h$ используется обработка шпангоутов на фрезерных станках, заполнитель не используется.
5. Методика, алгоритмы и программный комплекс FORMOS использованы при создании легкого многоцелевого самолета с $m_0 = 700$ кг. При создании мастер-модели фюзеляжа получены следующие результаты:
 - точность изготовления агрегатов составляет 1 мм на размерности максимального габаритного размера 6500 мм;
 - трудоемкость изготовления 1 м² площади поверхности макета фюзеляжа составила 192 человеко-часа;
 - длительность процесса от создания электронной модели до изготовления фюзеляжа самолета составила 45 дней с учетом технологических перерывов.

Таким образом, в данной диссертационной работе разработано научное, методическое (подходы, алгоритмы) и программное обеспечение (система FORMOS) процедуры проектирования формообразующей оснастки объектов авиационной техники с габаритными размерами от 1000 до 6000 мм с использованием экспертной системы при выработке проектных решений по конструкции оснастки.

Основные положения диссертации опубликованы в работах

в изданиях из перечня ведущих рецензируемых изданий, рекомендованных в действующем перечне ВАК:

1. **Мартынова С.В.** Этап макетирования при создании легкого многоцелевого самолета // Информационные технологии в проектировании и производстве, 2011. №4. С.39-42.
2. **Мартынова С.В.** Формирование подхода к автоматизированному макетированию крупногабаритных объектов // Электронный журнал «Труды МАИ», 2012. № 53. Электронный ресурс: <http://www.mai.ru/science/trudy>.
3. **Мартынова С.В.** Модуль системы автоматизированного проектирования формообразующей оснастки // В мире научных открытий. – Красноярск: Научно-инновационный центр, 2012. – №10. – С. 23-36.
4. **Мартынова С.В., Куприков М.Ю.** Экспертная система автоматизированного проектирования формообразующей оснастки FORMOS // Вестник Московского Авиационного Института, 2012. №5.

в журналах, сборниках трудов и тезисах международных и всероссийских конференций:

5. **Мартынова С.В.** Матрица будущего // Журнал «Прикладная геометрия Инженерная графика и компьютерный Дизайн» Выпуск № 9, Москва, 2007- С. 36-37.
6. **Мартынова С.В.** Создание автоматизированной методики макетирования объектов с поверхностью двойной кривизны // Обеспечение качества на всех этапах жизненного цикла изделия. Под ред. Б.В Бойцова, Ю.Ю. Комарова. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2008. – 452 с. С. 26-33.
7. **Мартынова С.В.** Масштабное прототипирование объектов со сложной поверхностью // Всероссийская студенческая научно-техническая школа-семинар «Аэрокосмическая декада». Под ред. М.Ю. Куприкова. – М.: Изд-во МАИ, 2008. – 100 с. С. 61-62.
8. **Мартынова С.В.** Макетирование крупногабаритных объектов со сложной поверхностью // Будущее машиностроения России. Сборник трудов Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 332 с. С. 286-288.
9. **Мартынова С.В.** Современные САПР как инструмент каркасного макетирования // VIII Всероссийская научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов "Информационные технологии, системный анализ и управление": Сборник трудов. – Таганрог: Изд. ТИЮФУ, 2010. - 423 с. С.275-278.

10. **Мартынова С.В.** Автоматизированное прототипирование изделий больших габаритных размеров // Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания: Сборник материалов IV Международной студенческой научно-практической конференции в 2-х частях. Часть 2. Под общ. ред. С.С. Чернова. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2010. – 239 с. С. 45-46.
11. **Мартынова С.В.** Требования к СГМ для решения вопросов каркасного прототипирования // Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания: Сборник материалов IV Международной студенческой научно-практической конференции в 2-х частях. Часть 2. Под общ. ред. С.С. Чернова. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2010. – 239 с. С. 47-49.
12. **Мартынова С.В.** Методика автоматизированного прототипирования сложных изделий // Применение инновационных технологий в научных исследованиях: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практ. конф. Отв. ред. А.В. Филонович. – Курск: Изд. ЮЗГУ, 2010. - 447 с. С. 299-301.
13. **Svetlana Martynova** «Method of prototyping large-size object with complex surface» Thesis of the Nineth International Seminar READ 2010, Warsaw, 2010. Электронный ресурс: http://read.meil.pw.edu.pl/abstracts/Student/Abstract_Svetlana_Martynova.pdf.
14. **Мартынова С.В.** Методика моделирования каркасной поверхности // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества. Сборник тезисов докладов участников Международной научно технической конференции, посвященной 40-летию образования МГТУ ГА.- М.: МГТУ ГА, 2011.- 362 с. С. 235.
15. **Мартынова С.В.** Критерии выбора материалов на этапе каркасного макетирования // Актуальные вопросы современной техники и технологии: Сборник докладов III-й Международной научной заочной конференции (Липецк, 29 января 2011 г.). В 2-х ч. Ч. 1. Под ред. А.В. Горбенко, С.В. Довженко. – Липецк: Издательский центр «Гравис», 2011. – 112 с. С. 97-99.
16. **Мартынова С.В.** Анализ САПР как инструмента макетирования крупногабаритных объектов // Гражданская авиация: XXI век: сборник материалов IV Международной молодежной научной конференции 12-13 апреля 2012 г. Под общ. ред. Н.У. Ушакова – Ульяновск: УВАУ ГА(И), 2012. – 224 с. С.175-176.
17. **Мартынова С.В.** Метод макетирования каркасной поверхности // Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2012», Москва. Сборник тезисов докладов. – М.: ООО «Принт-салон», 2012. С.20-21.
18. **Мартынова С.В.** Метод макетирования каркасных поверхностей в процессе изготовления летательных аппаратов // XXVIII Гагаринские чтения. Научные труды Международной молодежной научной конференции в 8 томах Москва, 10-14 апреля 2012 г. Т. 2. – М.: МАТИ, 2012. – 256 с. С. 22-24.