

Название рубрики: Машиностроение

УДК - 629.7.024

© Шекунов И.А., Зенина М.Е., Иванов Ю.Н. Анкудинов И.М.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г.

Иркутск, Россия

МЕТОДОЛОГИЯ СКВОЗНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОСНАСТКИ ДЛЯ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Шекунов Иван Александрович: лаборант исследователь НИЛ, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Российская Федерация,

e-mail: schekunovia@ex.istu.edu

Зенина Марина Евгеньевна: АО "Кронштадт", инженер-технолог 2 кат.

e-mail: lebedevame@ex.istu.edu

Иванов Юрий Николаевич: руководитель НИЛ, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Российская Федерация,

e-mail: iv_yuriy@istu.edu

Анкудинов Илья Михайлович: студент ППТм-23-1, институт авиамашиностроения и транспорта, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Российская Федерация,

e-mail: ilya.ankudinov.2016@mail.ru

Ivan Alexandrovich Shekunov: Research Laboratory Assistant, Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation,

e-mail: schekunovia@ex.istu.edu

Marina Evgenievna Zenina: Kronshtadt JSC, process engineer 2 cat.

e-mail: lebedevame@ex.istu.edu

Ivanov Yuri Nikolaevich: Head of the Research Institute, Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation,

e-mail: iv_yuriy@istu.edu

Ankudinov Ilya Mikhailovich: student of PPTm-23-1, Institute of Aircraft Engineering and Transport, Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation,

e-mail:ilya.ankudinov.2016@mail.ru

В статье представлена методология сквозного проектирования оснастки для изготовления изделий сложной геометрии из композиционных материалов. Особое внимание уделено изделиям с поверхностью двойной кривизны, которые находят широкое применение в авиации, судостроении и ветроэнергетике. Рассмотрен пример разработки формообразующей оснастки для лопасти беспилотного летательного аппарата с использованием технологий 3D-сканирования и параметрического моделирования. Описаны основные этапы обработки данных и построения CAD-модели, а также подходы к проектированию оснастки с учётом технологических требований. Показано, что внедрение цифровых технологий позволяет сократить сроки подготовки производства, повысить точность и снизить себестоимость мелкосерийных изделий.

Ключевые слова: оснастка; композитные материалы; 3D-сканирование; CAD-моделирование; цифровое проектирование.

A Methodology for End-to-End Tooling Design for Composite Structures with Complex Geometry

© Ivan A. Shekunov, Marina E. Zenina, Yuri N. Ivanov, Ilya M. Ankudinov
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

This article presents a methodology for end-to-end tooling design for the manufacture of composite materials with complex geometries. Particular attention is paid to products with double-curvature surfaces, which are widely used in aviation, shipbuilding, and wind energy. A case study is presented of developing molding for an unmanned aerial vehicle blade using 3D scanning and parametric modeling technologies. The article describes the main stages of data processing and CAD model construction, as well as approaches to tooling design taking into account technological requirements. It is shown that the implementation of digital technologies can reduce production preparation time, improve accuracy, and reduce the cost of small-scale production.

Keywords: tooling; composite materials; 3D scanning; CAD modeling; digital design; blade.

Введение. Целью данной работы является разработка и апробация методики сквозного проектирования оснастки с использованием цифровых (CAD/CAM/CAE) и аддитивных технологий. Внедрение такой методики направленно на сокращение сроков подготовки производства и повышение точности изготавливаемых деталей.

Традиционные методы изготовления технологической оснастки, например, металлической, отличаются высокой трудоёмкостью, длительным производственным циклом и значительными материальными затратами. Это существенно замедляет внедрение новых технологий и повышает себестоимость мелкосерийных изделий, особенно при работе с деталями сложной геометрии.

Основная часть. Для проектирования деталей со сложной геометрией необходимо изучение геометрических параметров подобных изделий, а также изучение метода 3D сканирования деталей. Данный метод позволяет воспроизвести любую геометрию с высокой точностью, без каких-либо искажений, что значительно упрощает дальнейшее проектирование. В качестве объекта исследования выступает лопасть для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Поскольку аэродинамические характеристики лопасти напрямую зависят от точности её геометрии, и даже минимальные отклонения могут привести к значительной потере эффективности, был применен метод 3D сканирования на основе серийно выпускаемого образца.

После описания общих принципов процесса рассмотрим последовательность основных этапов более детально. Алгоритм 3D-сканирования и дальнейшее преобразование данных в параметрическую CAD-модель можно представить в следующем виде:

1 Подготовка поверхности. Лопасть очищается от загрязнений, на её поверхность наносится антибликовое покрытие для исключения оптических помех. Затем размещаются маркерные метки, которые служат точками для последующего совмещения отдельных сканов. Сам процесс сканирования выполняется с множества ракурсов, при каждом из которых сканер с высокой плотностью захватывает координаты точек поверхности вместе с маркерами. Эти данные объединяются в единое облако точек.

2 Преобразование данных 3D-сканирования в параметрическую CAD-модель. Данный пункт представляет собой многоэтапную процедуру, начинающуюся с первичной обработки облака точек, где осуществляется фильтрация статистического шума, удаление выбросов и артефактов сканирования, а также обрезка посторонних элементов, не относящихся к геометрии лопасти. После этого отдельные сканы выравниваются по реперным маркерам и объединяются в целостное плотное облако точек. Затем это облако преобразуется в полигональную сеть через триангуляцию с последующей

оптимизацией - устранением отверстий, упрощением сетки при сохранении ключевых особенностей геометрии и сглаживанием полигонов для точного описания кривизны поверхности.

3 Этап коррекции. Коррекция включает в себя исправление производственных дефектов (вмятин, наплывов) через их "заглаживание" на основе смежных участков, идеализацию геометрии путём создания идеально острых кромок вместо скруглённых. А также формирование правильных геометрических примитивов и обеспечение плавных сопряжений поверхностей.

4 Реверс-инжиниринг. Заключается в преобразовании полигональной модели в параметрическую CAD-модель. Происходит это через построение кривых по ключевым сечениям с последующей "зашивкой" этих кривых в единую поверхность, которая проходит верификацию путём построения карты отклонений от исходного скана и корректируется до достижения заданных допусков (± 0.05 мм). В результате это даёт идеализированную параметрическую модель, пригодную для проектирования технологической оснастки. Готовая модель лопасти показана на рисунке 1.

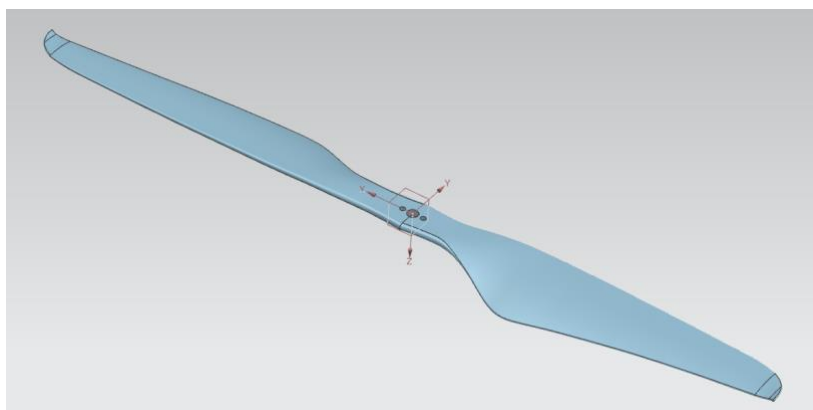


Рисунок 1 – CAD модель лопасти, созданная с помощью метода 3D сканирования

Для оценки качества полученной геометрии был выполнен анализ отражений, позволяющий визуально определить плавность сопряжений и равномерность кривизны поверхности. Результат показан на рисунке 2.

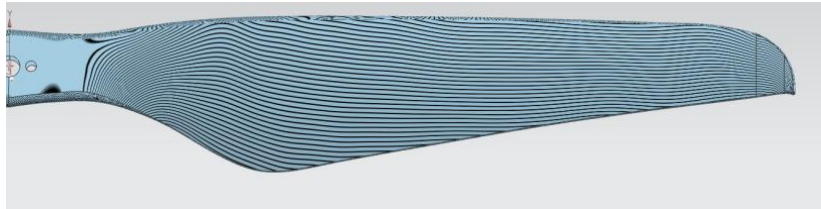


Рисунок 2 – Анализы поверхности лопасти

Метод показал, что линии отражения на большей части лопасти проходят непрерывно и без искажений, что свидетельствует о высоком качестве построения модели. Незначительные локальные искажения в зоне крепления указывают лишь на необходимость дополнительного сглаживания поверхности, не влияющего на общую точность и пригодность модели для дальнейшего проектирования.

После обработки параметрической модели, начинается самый сложный этап проектирования: моделирование оснастки, необходимо выставить некоторые требования к модели оснастки:

1. Шероховатость поверхности $Ra = 1,6$ мкм
2. Обеспечение допуска по контуру для фиксации изделия при обработке на станке.
3. Необходимо обеспечить отсутствие острых углов и кромок, в которых будет сложно сохранить геометрию при формовке.
4. Учет особенностей изготовления из композиционных материалов.
5. Необходимо предусмотреть базовые штифты для точного расположения оснасток друг относительно друга.

6. Необходимо предусмотреть крепеж с помощью которого будет осуществляться соприкосновение поверхностей не имеющих зазора.
7. Необходимо предусмотреть штифт для базирования сердечника
8. Необходимо предусмотреть по контуру детали утолщение для технологического припуска и избытков связующего.

После определения требований начинаем моделирование. Материалом оснастки был выбран модельный пластик, он имеет нужную жесткость и шероховатость после обработки. Сама оснастка представляет собой матрицу и пуансон, конструкция предусматривает, что в каждой точке разреза лопасть поделена по поверхности разъема. Такая поверхность получена по линии изоклины лопасти. Изоклина - линия на поверхности лопасти или в потоке, где угол между касательной к потоку и осью лопасти или касательной к профилю остается постоянным. В ходе моделирования были предусмотрены технологические решения, благодаря которым оснастка соответствует всем поставленным требованиям, а также имеет .

Готовая версия оснастки была создана в ПО Siemens NX с учетом всех требований и особенностей. Модель оснастки представлена на рисунке 3.

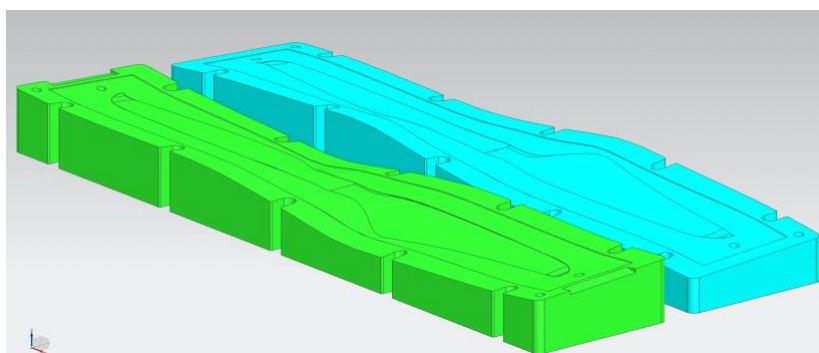


Рисунок 3 - Модель оснастки для лопасти БПЛА

После построения модели технологической оснастки была проведена проверка соответствия её формообразующей поверхности геометрии лопасти. Результат анализа выполнен с использованием сечения и показан на рисунке 4.

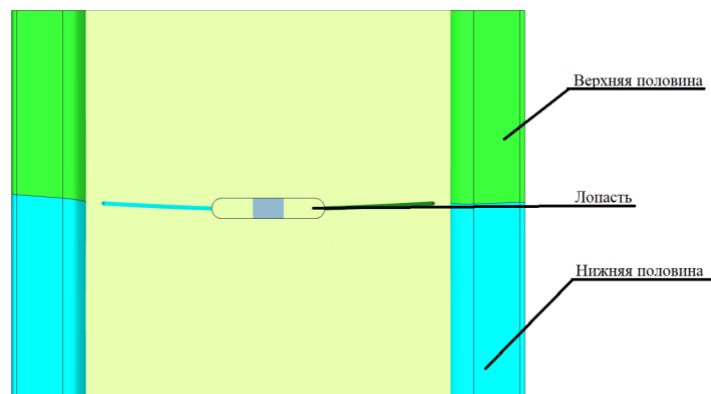


Рисунок 4 – Анализ спроектированной оснастки

Анализ показал, что поверхность формы полностью повторяет кривизну и аэродинамический профиль лопасти, обеспечивая равномерное прилегание по всей длине и отсутствие зазоров. Спроектированная оснастка, удовлетворяет всем предъявленным требованиям. В зонах сопряжения могут потребоваться локальные доработки для улучшения шероховатости и скругления кромок.

Таким образом, предложенная методика и конструкторские решения демонстрируют эффективный подход к созданию точной и функциональной оснастки для сложнопрофильных изделий. Использование реверс-инжиниринга и анализа геометрии позволяет значительно сократить время разработки по сравнению с традиционным математическим моделированием. Кроме того, опыт в разработке подобной оснастки и использование описанной технологии способствует реализации задач импортозамещения, обеспечивая возможность самостоятельного проектирования и изготовления подобных изделий.

Библиографический список

1. Долженков Д. Д. Опыт внедрения технологий реверс-инжиниринга и 3D-технологий в процесс конструкторско-технологической подготовки и строительства [Электронный ресурс] // Креативная экономика. — 2017. — Т. 11, № 12. — С. 1307–1320. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-vnedreniya-tehnologiy-revers-inzhiniringa-i-3d-tehnologiy-v-protsess-konstruktorско-tehnologicheskoy-podgotovki-i-stroitelstva> (дата обращения: 09.11.2025).
2. Баранова И. В. Информационные инструменты реверс-инжиниринга в стратегии деятельности инновационно-ориентированных структур [Электронный ресурс] // Инновации. — 2015. — № 3. — С. 45–51. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnye-instrumenty-reversinzhiniringa-v-strategii-deyatelnosti-innovatsionno-orientirovannyh-struktur> (дата обращения: 09.11.2025).
3. Мальцев В. Г. Технологическая оснастка [Электронный ресурс] : учебное пособие. — Омск : ОмГТУ, 2016. — 78 с. — URL: https://omgtu.ru/general_information/institutes/engineering_institute/departament_of_quot_mechanical_engineering_quot/educational-methodical-activity/%D0%A2%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F%20%D0%BE%D1%81%D0%BD%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BA%D0%B0..pdf (дата обращения: 09.11.2025).
4. Анализ рынка аддитивных технологий и услуг реверс-инжиниринга на основе аддитивных технологий [Электронный ресурс] // MegaResearch.ru. — 2023. — URL: https://www.megaresearch.ru/new_reality/rynok-uslug-revers-inzhiniringa-na-osnove-additivnyh-tehnologiy-vyshel-iz-teni-i-podderzhivaet-rossiyskoe-proizvodstvo (дата обращения: 09.11.2025).