

УДК 621.833:621.89

Технологичность конструкции зубчатых колес ГТД: роль конструкторско - технологического сотрудничества и цифрового двойника

Шеховцева Евгения Владимировна¹

evgeniya.shekhovtseva@uec-saturn.ru

SPIN-код: 2046-1217

Шеховцева Татьяна Владимировна²

prikL_mehanika@mail.ru

SPIN-код: 8984-7597

¹ ПАО «ОДК-Сатурн», Рыбинск, Россия² РГАТУ им. П.А. Соловьева, Рыбинск, Россия

Аннотация. Рассмотрено управление жизненным циклом изделия и его производством, которое представляет собой сложную задачу, требующую особого внимания на этапе формирования продукции. Представлены проблемы действующих процессов сотрудничества и взаимодополнения инженерных специалистов. Показано, что для успешного производства, например, зубчатых передач, необходимо тесное взаимодействие между проектированием и изготовлением, чтобы избежать потерь конструкторских замыслов. Предлагаемая модель управления инженерными связями призвана решить эту проблему, повысив эффективность подготовки производства и его последующего сопровождения. С учетом специфики взаимодействия конструктора и технолога сделано заключение о том, что процедура взаимодействия является существенным инструментом для повышения эффективности и конкурентоспособности предприятия, создавая возможность выгодно балансировать между требованиями конструктора и производственными условиями.

Ключевые слова: взаимоотношения конструктора и технолога, конструкторское сопровождение, зубчатая передача, цифровой двойник

Technological design of gears in a gas turbine engine: the role of design and technological cooperation and the digital twin

Shekhovtseva Evgeniya Vladimirovna¹

evgeniya.shekhovtseva@uec-saturn.ru

SPIN-code: 2046-1217

Shekhovtseva Tatyana Vladimirovna²

prikL_mehanika@mail.ru

SPIN-code: 8984-7597

¹ JSC "UEC-Saturn", Rybinsk, Russia² RSATU, Rybinsk, Russia

Abstract. The article discusses the management of product life cycle and its production, which is a complex task that requires special attention at the stage of product formation. The article presents the problems of current processes of cooperation and complementarity of engineering specialists. It is shown that for successful production, for example, of gears, it is necessary to have close interaction between design and manufacturing, in order to

avoid losses of design intentions. The proposed model of engineering communication management is designed to solve this problem by increasing the efficiency of production preparation and its subsequent support. Taking into account the specifics of the interaction between the designer and the technologist, it is concluded that the interaction procedure is an essential tool for increasing the efficiency and competitiveness of an enterprise, creating an opportunity to favorably balance between the designer's requirements and production conditions

Keywords: *relationship between the designer and the technologist, design support, gear, digital twin*

Введение. Разработка и производство зубчатых колес для газотурбинных двигателей — это сложный и многоэтапный процесс, требующий глубокого понимания различных аспектов, начиная от проектирования и заканчивая эксплуатацией готового изделия. Характерной чертой этого процесса является его длительный цикл, охватывающий этапы проектирования геометрии зубчатого механизма, собственно изготовление зубчатых колес и последующее техническое сопровождение в течение всего срока службы двигателя. Качество обработки каждой детали напрямую зависит от множества факторов, ключевыми среди которых являются физико-механические свойства используемого металла и применяемые методы механической и термической обработки. Успех всего предприятия во многом определяется тесным взаимодействием конструкторов, расчетчиков и технологов на всех этапах жизненного цикла зубчатой передачи [1].

Методы и материалы. Современные подходы к проектированию активно используют концепцию цифрового двойника (ЦД), представляющего собой виртуальную модель изделия, которая интегрирует вычислительные и информационные ресурсы, обеспечивая более эффективное и скоординированное взаимодействие всех участников процесса (рис. 1). Это позволяет реализовать принцип сквозного проектирования, где информация свободно передается между различными этапами жизненного цикла изделия.

В рамках управления конфигурацией и работоспособностью зубчатых колес особое значение приобретает конструкторско-технологическое сотрудничество. Такое тесное взаимодействие дает инженеру-конструктору уникальную возможность проводить прочностные расчеты и моделирование, основываясь на реальных данных о технологических процессах серийного производства. Это значительно повышает точность расчетов и снижает вероятность ошибок, связанных с несоответствием проектных решений и производственных возможностей. В результате, конструкторская документация (КД) разрабатывается с учетом реальных физических ограничений производства, что позволяет избежать невыполнимых требований и сократить время на доработку проекта (рис. 2). Рис. 2 иллюстрирует взаимосвязь между нормативной документацией (НД), технологическим процессом (ТП) и возможностями производства. При этом «искусственные» ограничения при разработке ТП можно исключить по предельным значениям размеров (рис. 3).

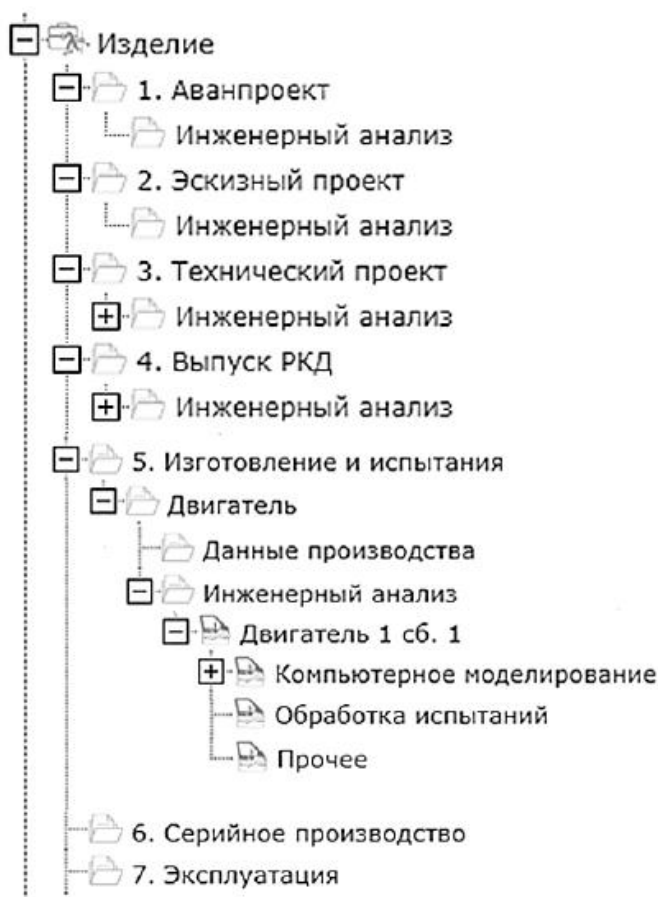


Рис. 1. Визуализация этапов цикла изделия в ЦД

Использование цифрового двойника, основанного на знаниях о серийных технологических процессах, позволяет избежать подобных ошибок и значительно повышает вероятность того, что изделие будет изготовлено в полном соответствии с требованиями КД.

Это дает возможность выявить потенциальные проблемы на ранних этапах проектирования и внести необходимые корректировки, предотвращая дорогостоящие переделки на стадии физического производства. Более того, ЦД позволяет оптимизировать технологические процессы, минимизировать отходы материала и повысить производительность труда. В современных условиях типичные принципы конструирования должны быть дополнены использованием инструментов цифрового моделирования и тесного взаимодействия между различными специалистами. Ключевым моментом является не просто создание цифрового двойника, а его эффективное использование на всех этапах, начиная от самых первых идей и концептов, заканчивая анализом работы готового изделия в реальных условиях эксплуатации.

В связи с низкой продуктивностью традиционных методов взаимодействия конструкторов и технологов [2–5] и с учетом существующей модели управления конфигурацией зубчатой передачи [1], разработана новая процедура, направленная на улучшение сотрудничества между этими отделами.



Рис. 2. Этап конструкторских работ



Рис. 3. Этап технологических работ

Эта процедура представляет собой информационно-справочную систему, объединяющую знания о материалах, применяемых в серийном производстве, с данными о фактическом качестве продукции, полученными в результате испытаний (см. таблицу). Алгоритм процедуры обеспечивает согласованность технических, конструкторских, технологических и информационных аспектов.

Массив знаний с учетом типовых технологических процессов

№	Критерий	Параметры	
1	Механические свойства материала	Марка материала	$E, \sigma_B, \sigma_{0,2}, \delta$
		ХТО	Глубина и твердость упрочненного слоя, твердость сердцевины
2	Признак сложности ТП	Точность обработки	
		Качество поверхностей	
3	Конструкция детали	Взаимная увязка	– Поверхностей – Форм – Размеров
		Назначение поверхностей по функциональности	

**Рис. 4.** Схема взаимоотношений между конструктором и технологом

Результаты. Эта процедура интегрирует организационные и технические этапы разработки и анализа компоновок и конструкторской документации зубчатых колес. В результате обеспечивается технологичность конструкции, что позволяет создавать зубчатые передачи, оптимальные как с точки зрения производства, так и с точки зрения их дальнейшей эксплуатации, используя доступные технологии. При проектировании учитывается существующий технологический опыт, что позволяет адаптировать инженерные решения к требованиям НД и фактическим технологическим процессам (рис. 4).

Заключение. В заключение, стоит подчеркнуть, что внедрение разработанной процедуры инженерных отношений, основанной на цифровых данных, значительно улучшает взаимодействие между конструкторами и технологами. Это приводит к сокращению сроков разработки и внедрения новых продуктов, а также позволяет более эффективно учитывать производственные ограничения при проектировании. Она позволяет оптимизировать про-

цесс разработки и внедрения новой продукции, обеспечивая баланс между конструкторскими решениями и возможностями производства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Шеховцева Е.В., Шеховцева Т.В. Конструкторско-технологическая инженерия рабочих поверхностей зубчатых колес газотурбинных двигателей. *Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова*, 2023, т. 26, № 3, с. 16–25. <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2023-3-16-25>
- [2] Хаймович И.Н. *Методология организации согласованных механизмов управления процессом конструкторско-технологической подготовки производства на основе информационно-технологических моделей*. Дис. ... д-ра техн. наук. Самара, 2009, 307 с.
- [3] Тесленко Е.В. *Информационная модель управления конструкторско-технологическим взаимодействием в процессе проектирования деталей машиностроения*. Дис. ... канд. техн. наук. Нижний Новгород, 2013, 169 с.
- [4] Чурилин С. В. *Разработка моделей и методов согласованного взаимодействия в системе контроля конструкторско-технологической подготовки производства ракетно-космических изделий*. Дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2021, 116 с.
- [5] Хранилов В.П. Анализ динамической модели управления конструкторско-технологическим взаимодействием в САПР. *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*, 2013, № 5 (102), с. 177–182.