

УДК 621.833 (03):629.735.45:621.89:621.01

DOI: 10.22213/2413-1172-2023-3-16-25

## Конструкторско-технологическая инженерия рабочих поверхностей зубчатых колес газотурбинных двигателей

**Е. В. Шеховцева**, кандидат технических наук, ПАО «Объединенная двигательная корпорация «Сатурн», Рыбинск, Россия

**Т. В. Шеховцева**, кандидат технических наук, доцент, Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева, Рыбинск, Россия

*Проектирование и производство зубчатых колес базируется на целом ряде специализированных принципов и дисциплин, направленных на прикладное применение научных и практических знаний. Предложенный способ организации проектирования с последующим производством конфигурации зубчатой передачи совместно с технологией виртуального моделирования жизненного цикла позволяет на этапе проектирования изделия в рамках существующего производства предсказать поведение зубчатых передач на определенных эксплуатационных режимах.*

*Обеспечение функциональных свойств зубчатой передачи – это комплексная задача, которая решается на всех этапах жизненного цикла механизма. Для решения необходима модель конструкторско-технологического управления работоспособностью, охватывающая жизненный цикл целиком с учетом управления конфигурацией зубчатого зацепления и способа объективной оценки эксплуатационных свойств для обеспечения функциональности и приемлемости. Приемлемость позиционируется как характеристика конструкции детали, узла и изделия в целом, подлежащей принятию решения о допустимости в эксплуатацию в случае наличия несоответствий при фактическом изготовлении.*

*Предложена модель конструкторско-технологической инженерии на основе анализа приемлемости зубчатой передачи, в частности классификации поврежденных рабочих поверхностей зубьев, основанная на достоверности прочностных расчетов, знаниях материалов и точности обработки, присущих серийному производству, с анализом работоспособности по функциональным параметрам. Данная модель позволяет считать допустимыми несоответствия, которые часто повторяются, но не являются существенными.*

*Рассмотрена возможность принятия оптимальных конструкторских решений на проектном этапе разработки конфигурации механизма в условиях использования информации о серийных технологических возможностях на базе концепции цифрового двойника при осуществлении обратной связи между технологическим и конструкторским направлениями конструирования зубчатой передачи. Это создает задел для разработки нового организационного подхода инженерной разработки конфигурации узлов при плотном выгодном сотрудничестве конструктора и технолога.*

**Ключевые слова:** физико-механические свойства материала, зубчатое колесо, конструкторско-технологическое взаимодействие, цифровой двойник, несоответствие, коэффициент приемлемости.

### Введение

**З**убчатые передачи системы приводов газотурбинных двигателей (ГТД) являются силовыми деталями, по рабочим поверхностям которых необходимо обеспечить требуемую несущую способность при эксплуатации с длительным сроком наработки механизмов и узлов. Работоспособность зубчатых колес связана с физико-механическими свойствами материалов, в частности высоколегированными конструкционными сталями мартенситного и перлитного класса при химико-термической обработке рабочих поверхностей и создании благоприятной структуры сердцевин. По этой причине весьма востребованы исследования в области прочности рабочих поверхностей зубчатых колес ГТД, представленные в работах [1–9],

нормативных документах ГОСТ 31381-2009, ГОСТ 27674–88, ISO 10825-1:2022, ANSI/AGMA 1010-E95, DIN 3979-1979 и практической наработки [10]. При этом в работах [11–19] установлена взаимосвязь поддержания работоспособности деталей, узлов и различных металлоконструкций относительно стабильности характеристик используемых материалов и технологической наследственности производства зубчатых колес. Нельзя упускать из виду и процесс проектирования зубчатого механизма по причине глобальности задачи из-за множества источников информации и сложностей интеллектуального труда при обработке результатов. Ввиду того что на показатели несущей способности зубчатых колес влияет качество поверхностного слоя сопрягаемых рабочих поверхностей,

при проектировании конструкции зубчатой передачи и технологии ее изготовления целесообразно использовать метод сквозного проектирования на базе концепции цифрового двойника. Это позволит организовать слаженную деятельность конструкторов, расчетчиков и технологов в течение жизненного цикла зубчатого механизма.

**Цель** исследования – разработка способов поддержания работоспособности зубчатых колес на базе характеристик материала и глубины расчетных исследований в течение всего жизненного цикла зубчатого механизма в условиях серийного производства зубчатых колес.

#### Методы и материалы

Процесс разработки любой металлической конструкции, особенно подвижной, – это изобретательская деятельность инженера, который обладает обширными знаниями в области проектирования конструкции детали, сборочной единицы и узла в целом. Инженер разрабатывает конструкцию зубчатого зацепления и выполняет ее прочностной расчет, опираясь на знания свойств материалов, режима работы и др. Результатом данной работы является конфигурация зубчатого механизма.

Первая ступень создания конфигурации зубчатого механизма – компоновка зубчатых колес в рамках механизма – выполняется конструктором. Вторая ступень заключается в прочностном анализе несущей способности зубчатой передачи и выполняется расчетчиком. Конфигурация зубчатого узла и системы приводов ГТД зависит от эксплуатационных, конструкторских и технологических факторов, определяющих их работоспособность.

Конфигурация зубчатой передачи изучается с точки зрения

- взаимного расположение частей зубчатой передачи, показателей применяемого материала, достоверности расчетов и качества изготовления;
- процесса наработки с учетом целостности рабочих поверхностей;
- выносливости силовых элементов.

Следовательно, функциональность зубчатой передачи формируется еще на стадии проектирования, где оценивается конфигурация механизма с учетом физико-механических свойств материала, технологии и точности изготовления при оцифровке прочностных показателей зубчатых колес.

#### Взаимосвязь конструкторской и технологической инженерии цикла производства механизма

Конструкторско-технологическая инженерия конфигурации зубчатой передачи включает в се-

бя объединение конструктивных и технологических мероприятий с начала жизненного цикла зубчатых колес. Это позволяет реализовать применение концепции цифрового двойника с использованием его на проектных стадиях цикла производственных сведений (рис. 1).

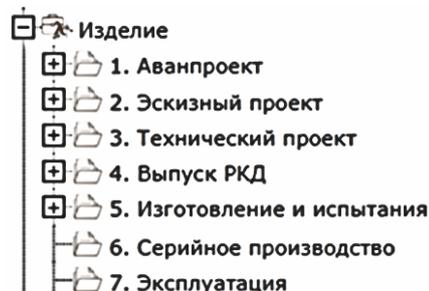


Рис. 1. Жизненный цикл изделия в платформе цифрового двойника

Fig. 1. Product lifecycle in the digital twin platform

На стадии проектирования (эскизного или технического) конструктор в тандеме с расчетчиком, исходя из рабочих условий зубчатого механизма, создает конфигурацию зубчатой передачи и модель с приложением рабочих нагрузок, граничных условий и физико-механических свойств материала серийной технологии с расчетом выносливости зубчатых колес.

Концентрация конструкторско-технологических и расчетных параметров предоставляет возможность создания расчетной копии физического зубчатого механизма с моделированием реального процесса зацепления зубьев с оптимизацией под возможности существующего производства. Это повышает достоверность расчетных работ, ориентированных на производство качественного изделия с учетом технологических возможностей и физической модели объекта. Согласованность конфигурации и расчетов облика зубчатой передачи с технологическими возможностями действующих серийных процессов на этапах проектирования обеспечивает на этапе выпуска конструкторской документации наиболее благоприятное использование технологических факторов. Условия концентрации конструктивных и технологических мероприятий для обеспечения эксплуатационных показателей на базе концепции цифрового двойника позволяют организовать метод конструкторско-технологической инженерии зубчатой передачи.

Метод конструкторско-технологической инженерии зубчатой передачи включает этапы жизненного цикла согласно ГОСТ Р 56136–2014 и анализ несущей способности рабочих по-

верхностей зубьев согласно ГОСТ 21354–81 или ISO 10300:2001, Р.007-2004. В связи с этим необходимо учитывать качество рабочих поверхностей зубьев, в том числе с учетом наработки. Степень функциональности классифицируется согласно качеству сопрягаемых поверхностей при своевременном внесении возможной коррекции: полнота контакта, направление изменений целостности поверхностей и др.

Координация процесса наработки зубчатой передачи в рамках ее жизненного цикла – это совокупный метод мониторинга и оценки способности сопрягаемых поверхностей к многоциклового эксплуатации без существенного снижения работоспособности. Метод конструкторско-технологической инженерии зубчатой передачи базируется на распределении показателей зубчатого механизма по группам на основании конструктивных, прочностных, техно-

логических, эксплуатационных признаков с учетом их связи (рис. 2).

Используемый метод прочностного анализа выносливости рабочих поверхностей зубчатых колес – это очень трудоемкий процесс, связанный с большим объемом вычислительных работ и применением обширных знаний при значительном переплетении конструкторско-технологических процессов, но при ограниченных справочных данных по материалам деталей. Это ограничение не позволяет выполнять координацию конструкторско-технологической инженерии в полном объеме при имеющихся современных возможностях.

Следовательно, предлагается синтезировать требования действующей документации ГОСТ 21354, ISO 6336-5 и других с оценкой норм прочности через метод конструкторско-технологической инженерии зубчатой передачи и применение концепции цифрового двойника.

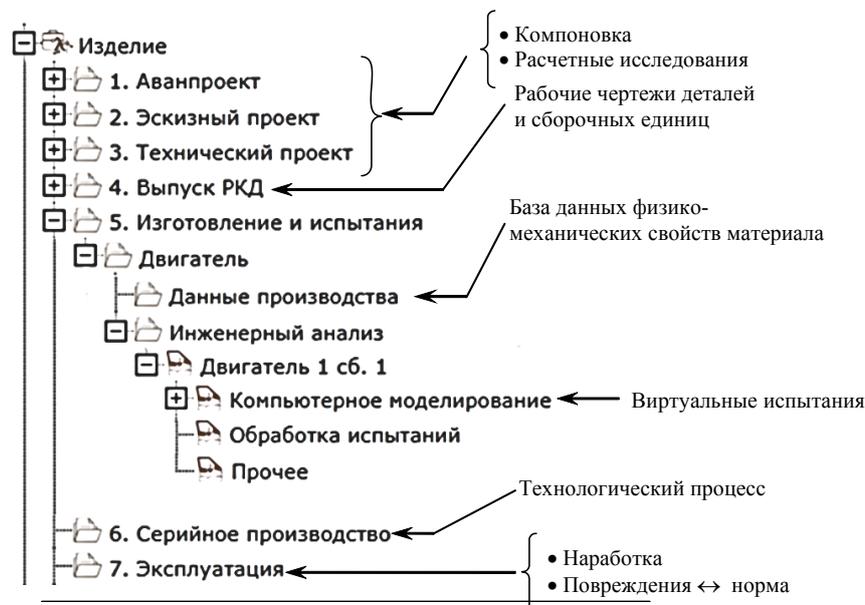


Рис. 2. Визуализация размещения данных в цифровом двойнике

Fig. 2. Visualization of data placement in digital twin

Входящая информация для конструкторско-технологической инженерии зубчатой передачи включает в себя:

- основные геометрические данные зубчатого венца, точность и качество изготовления;
- характеристику материала ( $E$ ,  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ , метод химико-термической обработки и др.);
- режим работы и ресурс.

Приняты следующие обозначения:  $E$  – модуль упругости материала, МПа;  $\sigma_B$  – предел прочности при растяжении, МПа;  $\sigma_{0,2}$  – предел текучести, МПа.

Внедрение технологии виртуальной модели изделия предоставляет возможность применения на проектировочных этапах жизненного цикла зубчатого механизма информации согласно серийным процессам производства. Это создает предпосылки для разработки метода конструкторско-технологической инженерии зубчатой передачи. Сущность метода конструкторско-технологической инженерии заключается в оценке допустимости конфигурации зубчатых колес по критериям качества изготовления, цельности рабочих поверхностей через вероят-

ность возникновения повреждения или других неблагоприятных событий и влияния на работоспособность механизма (матрица приоритетов).

Сфера использования метода конструкторско-технологической инженерии – это последовательность проектировочных, изготовительных и эксплуатационных этапов. Функциональность зубчатого зацепления оценивается через критерий существенности влияния на вероятность возникновения несоответствия при совокупности конструкторско-технологических аспектов относительно определения выносливости зубчатых колес.

Заключительное действие по методу конструкторско-технологической инженерии зубчатой передачи по функциональной оценке механизма – это решение о приемлемости или недопустимости механизма на базе систематизации конструкторских, технологических и эксплуатационных критериев относительно работоспособности, и отражение данных критериев в технической документации на деталь. Систематизация конструкторско-технологических критериев и условий работы – это базовая составляющая и связующий элемент рабочей конструкторской документации и технологии изготовления с наработкой детали. Таким образом реализуется взаимосвязь между конструкторской документацией и серийным производством через применение действительной информации по физико-механическим свойствам материалов детали и функциональными свойствами в процессе работы механизма.

Предложенный метод конструкторско-технологической инженерии зубчатой передачи можно использовать при разработке новых зубчатых зацеплений, реконструкции применяемых соединений для увеличения выносливости рабочих поверхностей и принятии решения о дальнейшей эксплуатации зубчатых передач, находящихся в работе, а также совершенствовании процессов изготовления зубчатых колес.

Зубчатые колеса входят в состав силового узла ГТД. Это обуславливает использование понятия приемлемости конфигурации, точности

изготовления с учетом возможных повреждений в процессе эксплуатации. Следовательно, применение традиционного прочностного анализа для определения выносливости недостаточно. Поэтому предложено использовать коэффициент приемлемости, определяющий степень появления отклонений.

На коэффициент приемлемости оказывают влияние критерии прочностных расчетов и режимов работы, характеристики материала и качество обработки детали. Рационально коэффициент приемлемости зубчатой передачи  $R_V$  определять через матрицу приоритетов [20, 21] значимых конструкторско-технологических процессов и событий для анализа влияния факторов проектирования, производства и использования. Анализ этих факторов выполняется через количественную оценку годности сопрягаемых поверхностей зубчатого венца в условиях приемлемости  $R_V$  и допустимости  $P_3^n$ . Критерий функциональной приемлемости  $R_V$  определяется через существенность параметров нагрузки и вероятность появления дефектов на рабочих поверхностях с учетом ранее приобретенного опыта эксплуатации аналогичных конструкций произведенных и работающих в схожих условиях.

На основе матрицы приоритетов процессов определяется значение коэффициента приемлемости  $R_V$ , где выделяются области допустимости действий при классификации по критичности воздействия событий. Взаимосвязь уровня воздействия на работоспособность зубчатой передачи  $R$  и вероятность возникновения повреждений  $V$  приведена в матрице приоритетов коэффициента приемлемости  $R_V$  (табл. 1). Области матрицы приоритетов формируются по принципу выявления эксплуатации годных изделий с учетом классификации отклонений сопрягаемых поверхностей профиля зубьев. При этом к отклонениям рабочего профиля относятся и повреждения при наработке, и погрешности при производстве, и условные отступления, допущенные при проектировании.

Таблица 1. Матрица коэффициента приемлемости  $R_V$

Table 1.  $R_V$  acceptance ratio matrix

Уровень воздействия на работоспособность ( $R$ )		Вероятность события ( $V$ )		
		Невозможно	Маловероятно	Вероятно
		1	2	3
Нет влияния	1	1	2	3
Несущественное	2	2	4	6
Существенное	3	3	6	9
Критическое	4	4	8	12

Коэффициент приемлемости  $R_V$  передачи зависит:

1) от глубины прочностных расчетов  $J$  – традиционный расчет или сделанный на основе действительных характеристик материала  $M$ ;

2) качества обработки рабочих поверхностей  $T$ ;

3) режимов работы зубчатого зацепления  $U$ .

Критерий достоверности расчетов  $J$  геометрии зацепления относительно серийного процесса составляет:

- $J = 1$  – при расчете на базе объемной структурной модели;

- $J = 2$  – при традиционном анализе на базе ГОСТ 21354 или ISO 10300:2001.

Критерий достоверности расчетов  $J$  с учетом степени повреждаемости  $K_n$  необходимо откорректировать при условии дополнительного значения, где  $K_n = 0$  в случае отсутствия дефектов или их незначительности и  $K_n = 1$ , когда дефек-

ты на рабочей поверхности значимые или недопустимые.

Тогда совокупное значение расчетов, ориентированное на практическую наработку, определяется суммой  $J + K_n$ .

В таблице 2 критерий информативности по физико-механическим свойствам материала  $M$  оценивается исходя из условий использования информации из серийных процессов ( $M = 1$ ), документов на поставку материала ( $M = 2$ ) и теоретических общих сведений ( $M = 3$ ), формируя сводный весовой коэффициент  $A$ .

Критерий режимов работы  $U$  определяется исходя из условий информации об эксплуатации зубчатой передачи: режим работы идентичен аналогу ( $U = 1$ ) – режим работы согласно теории подобия по геометрии механизма, процессу изготовления и эксплуатации ( $U = 2$ ), теоретический режим работы ( $U = 3$ ).

Таблица 2. Матрица расчетов с влиянием знаний по свойствам материалов

Table 2. Calculation matrix with the influence of the material properties knowledge

$M$	$J + K_n$		
	1	2	3
1	1	2	3
2	2	4	6*
3	3	6*	9*

\* – недопустимая область, в дальнейшей оценке конструкторско-технологическая инженерии не используется

Совокупное влияние способа расчета, дефектов, свойств материалов и режима работы можно оценить по следующей формуле, формируя сводный весовой коэффициент  $N$ :

$$N = UA. \quad (1)$$

Одновременно учтено влияние критерия качества обработки  $T$  профиля сопряжения зубьев механизма на коэффициент приемлемости, где

- $T = 1$  – в случае обработки детали согласно технической документации;

- $T = 2$  – в случае наличия незначительных производственных несоответствий относительно конструкторской документации;

- $T = 3$  – при значительных нарушениях технической документации.

Приоритетная таблица 3 по коэффициенту допустимости конфигурации  $P_3^H$  визуальна распределена на три области потенциального использования механизма.

Комплексная качественная оценка приемлемости эксплуатации зубчатой передачи приведена в таблице 4.

Для выполнения совокупного анализа функциональности зубчатого механизма на базе характеристик материала, процессов производства, геометрии и режима работы разработана схема инженерии зубчатой передачи на базе конструкторско-технологического обеспечения работоспособности.

Таблица 3. Критерий допустимости конфигурации

Table 3. Configuration acceptability criterion

$T$	$N$							
	1	2	3	4	6	8	12	
1	1	2	3	4	6	8	12	
2	2	4	6	8	12	16	24	
3	3	6	9	12	18	24	36	

Схема на рисунке 3 визуализирует взаимоотношения между конструкторским и технологическим направлениями формирования эксплуатационных свойств зубчатой передачи.

Разработанную схему можно использовать самостоятельно в течение всего жизненного цикла вне зависимости от этапа. Это реализовано в силу прямых и обратных связей между конструктивными, технологическими и функ-

циональными направлениями жизненного цикла. Следовательно, использование метода конструкторско-технологической инженерии одновременно с технологией виртуальной модели

зубчатой передачи гарантирует технологичность конфигурации с учетом физико-механических характеристик материала шестерен на основе серийных процессов.

Таблица 4. Оценка функциональной приемлемости  
Table 4. Functional acceptability assessment

$R_V$	Достоверность свойств материала		
	Теоретическая	Сертификат поставки	Эмпирическая
1	Приемлемая область		
2			
3			
4	Область неопределенности		
6	Недопустимая область		
8			
9			
12			

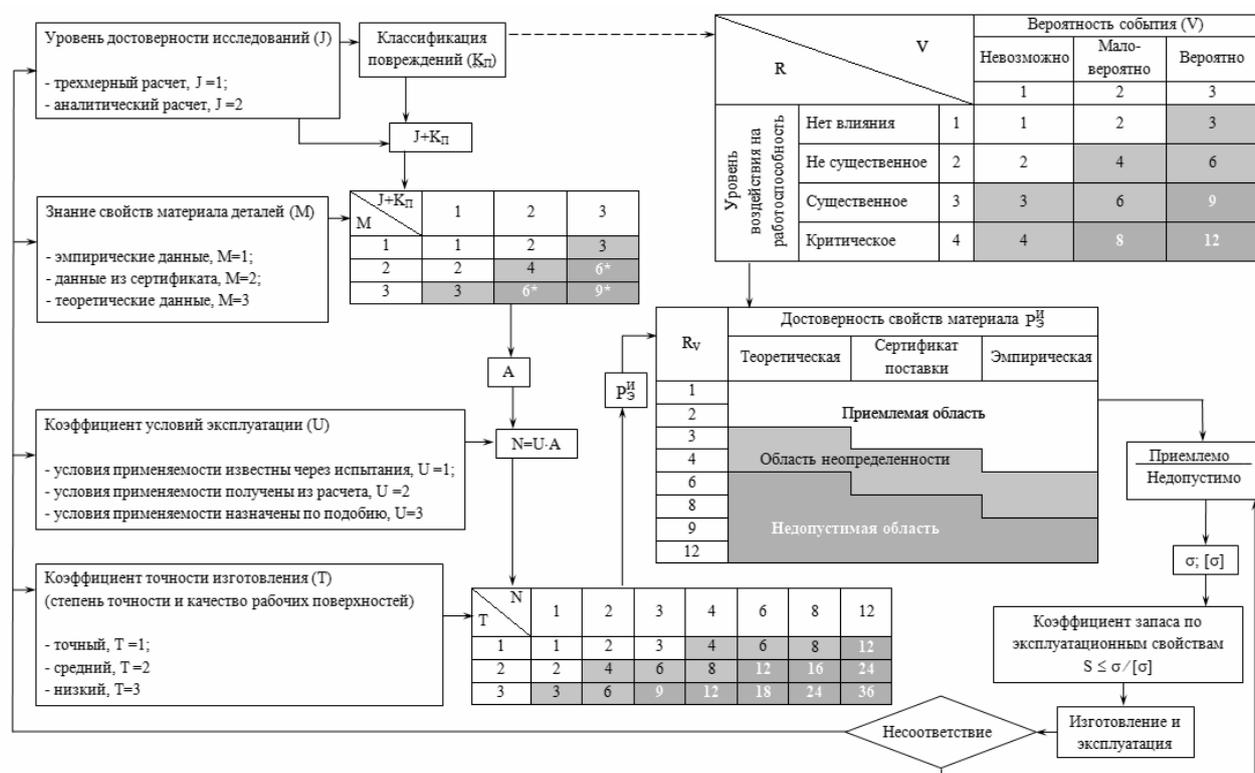


Рис. 3. Схема инженерии зубчатой передачи  
Fig. 3. Gear engineering diagram

Технология виртуального моделирования в сочетании с методом конструкторско-технологической инженерии зубчатой передачи обеспечивает обратную связь от производства и эксплуатации к проектным этапам жизненного цикла (рис. 4).

Обратная связь очень полезна технологам при обнаружении несоответствий выпущенной продукции конструкторской документации при изготовлении или наработки изделия.

То есть используя действительные параметры производства и эксплуатации, можно провести прочностной расчет на базе объемной модели с учетом несоответствия, опираясь на четкие физико-механические свойства зубчатых колес. Данный анализ позволяет оценить функциональные свойства зубчатой передачи в реальных условиях производства и допустить в эксплуатацию приемлемую деталь.



Рис. 4. Обратная связь технологии виртуальной инженерии

Fig. 4. Feedback technology virtual engineering

## Выводы

Разработан способ управления конфигурацией зубчатой передачи на базе объединения проектных работ и технологических параметров в результате применения критериев достоверности расчетных работ в кооперации с информацией о характеристиках материала, качеством обработки и режимов эксплуатации, создавая условия по коэффициенту запаса выносливости механизма, основываясь на условии приемлемости применения.

Разработан метод формирования конфигурации элементов зубчатой передачи и других характеристик функционирования системы приводов ГТД, результатом которого является целостная совокупность знаний, свойств и характеристик, описанных в схеме инженерии зубчатых колес. Использование метода конструкторско-технологической инженерии в условиях современного производства и применение технологии виртуального моделирования позволяет управлять проектными решениями с ожиданием положительного достижения поставленных целей, в условиях обоюдывыгодного сотрудничества конструкторского и технологического направления при увеличении шансов обеих сторон на достижение необходимого ре-

зультата. Мероприятия, осуществляемые в ходе кооперации конструктора и технолога в течение жизненного цикла механизма, являются для каждого существенными и незаменимыми.

## Библиографические ссылки

1. Комплексная фрактодиагностика авиационных конических зубчатых колес / Н. В. Туманов, Н. А. Воробьев, А. И. Калашникова, Д. В. Калинин, Е. В. Кожаринов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84, № 2. С. 55–63.
2. Rudenko S.P., Val'ko A.L. (2017) Contact fatigue resistance of carburized gears from chromium-nickel steels. *Metal science and heat treatment*, 2017, vol. 59, no. 1-2, pp. 60-64.
3. Сопротивление контактной усталости крупномодульных зубчатых колес из хромоникелевых сталей / С. П. Руденко, А. Л. Валько, С. А. Шишко, П. Г. Карпович // Механика машин, механизмов и материалов. 2019. № 1 (46). С. 58–63.
4. Онишков Н. П., Короткин В. И. К оценке контактно-усталостной долговечности химико-термоупрочненных зубчатых колес // Вестник Донского государственного технического университета. 2017. Т. 17, № 2 (90). С. 5-13.
5. Развитие терминологии в области зубчатых передач и трансмиссий. Ч. 3. Идентификация понятий по видам повреждений зубчатых колес / В. Е. Старжинский, В. И. Гольдфарб, С. В. Шилько, Е. В. Ша-

лобаев, Е. И. Тескер // Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение. 2017. Т. 15, № 3. С. 51–61.

6. Wang Q.J., Chung Y-W. (2013) Encyclopedia of Tribology. Springer New York Heidelberg Dordrecht London, 2013, 4190 p.

7. Повышение ресурса работы зубчатой передачи на основе выбора технологий упрочнения рабочих поверхностей зубьев / Л. И. Куksenova, С. А. Поляков, М. С. Алексеева, С. В. Рубцов // Вестник научно-технического развития. 2019. № 3 (139). С. 24–36.

8. Радченко С. П., Валько А. Л., Сандомирский С. Г. О применении экономнолегированных сталей для высоконагруженных зубчатых колес // Металлургия машиностроения. 2020. № 2. С. 14–18.

9. Овсеенко А. Н., Клауч Д. Н., Носов Д. П. Качество поверхностного слоя цилиндрических зубчатых колес при механической обработке // Тяжелое машиностроение. 2019. № 4. С. 19–23.

10. Шеховцева Т. В., Шеховцева Е. В. Особенности повреждения рабочих поверхностей зубчатых колес ГТД // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 6. С. 406–416.

11. Киричек А. В., Соловьев Д. Л., Федонина С. О. Проявление технологической наследственности при исследовании твердости деформационно термически упрочненных сталей // Научные технологии в машиностроении. 2019. № 8 (98). С. 25–28.

12. Сулов А. Г. Развитие учения о контактной жесткости и инженерия поверхностей деталей машин // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 11 (72). С. 12–17.

13. Моргаленко Т. А. Технология обработки поверхностей трения скольжения, основанная на применении твердых износостойких покрытий, с учетом влияния технологической наследственности // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 12 (114). С. 31–38.

14. К вопросу об учете технологической наследственности при формировании свойств деталей / Э. С. Гордеева, В. Б. Богущкий, Л. Б. Шрон, Ю. К. Новоселов // Механика – XXI веку. 2018. № 17. С. 248–254.

15. Мильников В. В., Шетулов Д. И., Мясников А. М. Влияние режимов термической обработки мартенситостареющей стали на усталостные характеристики и параметры микродеформации // Современные научные технологии. 2021. № 6-1. С. 74–78.

16. Причины разрушения зубчатых колес / А. П. Яковлева, Л. В. Савельева, В. А. Наумов, С. Н. Шарапов, Л. И. Бессуднов // Главный механик. 2017. № 1. С. 43–48.

17. Голубев А. П., Корнеев А. А. Разработка и применение перспективных методов инженерии поверхностей деталей машин с использованием информационных технологий // Информационные технологии. Эволюционные процессы. 2018. С. 104–108.

18. Крукович М. Г., Федотова А. Д. Инженерия поверхностей деталей машин для повышения изно-

состойкости // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2021. № 34. С. 52–58.

19. Шарая О. А., Пастухов А. Г., Кравченко И. Н. Инженерия поверхности упрочненных деталей. М. : Научно-издательский центр ИНФРА-М, 2020. 124 с.

20. Бобрышев А. Д., Панова (Зенова) Е. С. Применение современных управленческих инструментов при внедрении новаций на промышленных предприятиях. Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2016. 152 с.

21. Клименко И. С., Плутанов М. А. О ранжировании критериев выбора решений, сформированных на матрице риска // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2017. № 2. С. 63–65.

## References

1. Tumanov N.V., Vorobyov N.A., Kalashnikova A.I., Kalinin D.V., Kozharinov E.V. (2018) [Complex fractodiagnosics of aircraft bevel gears]. *Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov*, 2018, vol. 84, no. 2, pp. 55-63 (in Russ.).

2. Rudenko S.P., Val'ko A.L. (2017) Contact fatigue resistance of carburized gears from chromium-nickel steels. *Metal science and heat treatment*, 2017, vol. 59, no. 1-2, pp. 60-64.

3. Rudenko S.P., Valko A.L., Shishko S.A., Karpovich P.G. (2019) [Contact fatigue resistance of large-module gears made of chromium-nickel steels]. *Mehanika mashin, mehanizmov i materialov*, 2019, no. 1, pp. 58-63 (in Russ.).

4. Onishkov N.P., Korotkin V.I. (2017) [Towards an Assessment of the Contact-Fatigue Durability of Chemically Heat-Treated Gear Wheels]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 5-13 (in Russ.).

5. Starzhinsky V.E., Goldfarb V.I., Shilko S.V., Shalobaev E.V., Tesker E.I. (2017) [Identification of concepts by types of gear damage]. *Jenergetičeskoe, metallurgičeskoe i himičeskoe mashinostroenie*, 2017, vol. 15, no. 3, pp. 51-61 (in Russ.).

6. Wang Q.J., Chung Y-W. (2013) Encyclopedia of Tribology. Springer New York Heidelberg Dordrecht London, 2013, 4190 p.

7. Kuksenova L.I., Polyakov S.A., Alekseeva M.S., Rubtsov S.V. (2019) [Increasing the resource of the gear transmission based on the choice of technologies for strengthening the working surfaces of teeth]. *Vestnik nauchno-tehničeskogo razvitija*, 2019, no. 3, pp. 24-36 (in Russ.).

8. Radchenko S.P., Valko A.L., Sandomirsky S.G. (2020) [On the application of economically alloyed steels for high-loaded gears]. *Metallurgija mashinostroenija*, 2020, no. 2, pp. 14-18 (in Russ.).

9. Ovseenko A.N., Klauch D.N., Nosov D.P. (2019) [The quality of the surface layer of cylindrical gears during mechanical processing]. *Tjzheloe mashinostroenie*, 2019, no. 4, pp. 19-23 (in Russ.).

10. Shekhovtseva T.V., Shekhovtseva E.V. (2019) [Features of damage to working surfaces of GTE gear

wheels]. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki*, 2019, no 6, pp. 406-416 (in Russ.).

11. Kirichek A.V., Soloviev D.L., Fedonina S.O. (2019) [Manifestation of technological heredity in the study of hardness of deformation-thermally hardened steels]. *Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii*, 2019, no. 8, pp. 25-28 (in Russ.).

12. Suslov A.G. (2018) [Development of the doctrine of contact stiffness and surface engineering of machine parts]. *Vestnik Brjanskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta*, 2018, no. 11, pp. 12-17 (in Russ.).

13. Morgalenko T.A. (2020) [Processing technology of sliding friction surfaces based on the use of hard wear-resistant coatings, taking into account the influence of technological heredity]. *Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii*, 2020, no. 12, pp. 31-38 (in Russ.).

14. Gordeeva E.S., Bogutsky V.B., Shron L.B., Novoselov Yu.K. (2018) [On the issue of technological heredity in the formation of part properties]. *Mehaniki - XXI veku*, 2018, no. 17, pp. 248-254 (in Russ.).

15. Mylnikov V.V., Shetulov D.I., Myasnikov A.M. (2021) [Influence of heat treatment modes of sparingly alloyed steels on fatigue characteristics and microdeformation parameters]. *Sovremennye naukoemkie tehnologii*, 2021, no. 6-1, pp. 74-78 (in Russ.).

16. Yakovleva A.P., Savelyeva L.V., Naumov V.A., Sharapov S.N., Bessudnov L.I. (2017) [Causes of gear

wheel failure]. *Glavnyj mehanik*, 2017, no. 1, pp. 43-48 (in Russ.).

17. Golubev A.P., Korneev A.A. (2018) [Development and application of promising methods for engineering surfaces of machine parts using information technologies]. *Informacionnye tehnologii. Jevoljucionnyye processy*, 2018, pp. 104-108 (in Russ.).

18. Krukovich M.G., Fedotova A.D. (2021) [Surface engineering of machine parts to improve wear resistance]. *Novye materialy i tehnologii v mashinostroenii*, 2021, no. 34, pp. 52-58 (in Russ.).

19. Sharaya O.A., Pastukhov A.G., Kravchenko I.N. (2020) *Inzhenerija poverhnosti uprochnennykh detalej* [Surface engineering of hardened parts]. Moscow: LLC Scientific Publishing Center INFRA-M, 2020, 124 p. (in Russ.).

20. Bobryshev A.D., Panova (Zenova) E.S. (2016) *Primenenie sovremennykh upravlencheskih instrumentov pri vnedrenii novacij na promyshlennyykh predpriyatijah* [Application of modern management tools when implementing innovations at industrial enterprises]. Moscow, Berlin: Direct-Media Publ., 2016, 152 p. (in Russ.).

21. Klimenko I.S., Plutanov M.A. (2017) [On the ranking of decision selection criteria formed on the risk matrix]. *Vestnik Rossijskogo novogo universiteta. Serija: Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie*, 2017, no. 2, pp. 63-65 (in Russ.).

## Design and Technological Engineering of Gear Wheel Working Surfaces in a Gas Turbine Engine

*E.V. Shekhovtseva*, PhD in Engineering, Public Joint Stock Company "United Engine Corporation "Saturn", Rybinsk, Russia

*T.V. Shekhovtseva*, PhD in Engineering, Associate Professor, P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russia

*The design and production of gear wheels includes a number of specialized principles and disciplines aimed to practical application of scientific and practical knowledge. The proposed design method for the subsequent production of the gear configuration together with the technology of virtual life cycle modeling allows predicting its behavior in certain operating modes taking into account the capabilities of an existing production at the design stage.*

*Ensuring the functional properties of the gearing is a complex task, which is solved at all stages of the mechanism life cycle. The solution requires a model of design and technological control of operability, covering the whole life cycle, based on the management of the gearing configuration and the way of objective assessment of the operational properties, based on ensuring the functionality and acceptability.*

*A model of design engineering based on the analysis of the gear acceptability, particularly of the tooth working surface damage classification, based on the reliability of strength calculations, knowledge of materials and precision machining inherent in serial production, with the analysis of the serviceability by functional parameters is proposed. This model allows considering the inconsistencies as acceptable, which often appear, but are not significant.*

*The possibility of making optimal design decisions at the design stage of developing the mechanism configuration in the conditions of using information on serial technological capabilities based on the concept of a "digital twin" when performing feedback between the technological and design directions of gear wheel creating is considered. This creates the groundwork for the development of a new organizational approach to the engineering development of the configuration of assemblies with a tight advantageous cooperation of the designer and technologist.*

**Keywords:** physical-mechanical property of material, gear wheel, design-technological interaction.

Получено 26.06.2023

**Образец цитирования**

Шеховцева Е. В., Шеховцева Т. В. Конструкторско-технологическая инженерия рабочих поверхностей зубчатых колес газотурбинных двигателей // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2023. Т. 26, № 3. С. 16–25. DOI: 10.22213/2413-1172-2023-3-16-25.

**For Citation**

Shekhovtseva E.V., Shekhovtseva T.V. (2023) [Design and Technological Engineering of Gear Wheel Working Surfaces in a Gas Turbine Engine]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2023, vol. 26, no. 3, pp. 16-25 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2023-3-16-25.