

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №8 (146). С.35-42.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №8 (146). P. 35-42.

Научная статья
УДК 621.829.93/621.833/621.83.061.1/669.01
doi: 10.30987/2223-4608-2023-35-42

Технологическое обеспечение изготовления зубчатых колес авиационных газотурбинных двигателей с учетом нестабильности физико-механических свойств их материалов

**Вячеслав Феокистович Безъязычный¹, Д.Т.Н.
Евгения Владимировна Шеховцева², К.Т.Н.**

¹ Рыбинский государственный авиационный технический университет,
Рыбинск, Россия

² Публичное акционерное общество «Объединенная двигательная корпорация – Сатурн»,
Рыбинск, Россия

¹ technology@rsatu.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

² evgeniya.shekhovtseva@uec-saturn.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Ключевое место при производстве газотурбинных двигателей, в том числе и зубчатых колес, как авиационного, так и судового, и энергетического назначения, отводится конструкционным сталям. В связи с этим важна не только физическая природа изготовления зубчатых колес, но прежде всего формализация и управление обеспечением физико-механических свойств материалов с учетом их стабильности. Рассмотрена проблема технологического обеспечения изготовления зубчатых колес газотурбинных двигателей, где конструкция, материал детали и технология изготовления анализируются неотъемлемо друг от друга. Разработана взаимосвязь качества рабочих поверхностей с технологическими и прочностными характеристиками относительно эксплуатационных свойств. Исследована нестабильность механических свойств конструкционного материала и обосновано их формирование на основе технологической наследственности при соответствии технологического процесса изготовления детали ее материалу и назначению. Наглядно представлена нестабильность физико-механических свойств на примере одной марки стали, но при различных методах получения заготовки и материала в состоянии поставки. Изучено влияние термической обработки на стабилизацию физико-механических свойств материала с учетом наследования свойств. Разработана модель контактного взаимодействия зубчатых колес с учетом внешних и внутренних воздействий, как в процессе изготовления, так и при эксплуатации (свойства материала, силы в зацеплении, температурное поле и т. д.). Кумулятивная модель, ориентированная на реакцию конструкционного материала при обработке и взаимодействия в работе, обобщает функциональное назначение, физико-механические свойства и особенности поведения в условиях эксплуатации. Представлено управление эксплуатационными свойствами зубчатых колес в неразделимой связи с технологией и их материалами – структурным состоянием и физико-механическими свойствами.

Ключевые слова: газотурбинный авиационный двигатель, зубчатое колесо, физико-механические свойства, конструкционный материал, упрочненный материал поверхностного слоя, сердцевина материала

Для цитирования: Безъязычный В.Ф., Шеховцева Е.В. Технологическое обеспечение изготовления зубчатых колес авиационных газотурбинных двигателей с учетом нестабильности физико-механических свойств их материалов // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 8 (146). С. 35–42. doi: 10.30987/2223-4608-2023-35-42

Engineering support for the manufacture of gears of aviation gas turbine engines providing for the instability of the physical and mechanical properties of their materials

Vyacheslav F. Bezyazichniy¹, D. Eng.
Evgeniya V. Shekhovtseva², Ph.D Eng.

¹ Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov, Rybinsk, Russia

² SPA "UEC-Saturn" Rybinsk, Russia

¹ technology@rsatu.ru

² evgeniya.shekhovtseva@uec-saturn.ru

Abstract. The key place in the production of gas turbine engines, including gears, both aviation and marine, also power generation turbines, is given to sectional steels. Consequently, not just a physical nature of gear wheels manufacture plays an important part, but formal characterization and the supply of physical and mechanical properties of materials are in the priority, taking into account the reliability of the materials. The problem of technological support for the manufacture of gears for gas turbine engines is viewed with simultaneous analysis of the part material, its manufacturing technology and investigated inseparably from each other. The interrelation of working surfaces quality and technological and strength characteristics with respect to operational properties is developed. The instability of the mechanical properties of the structural material is investigated and their formation is justified on the basis of technological heredity in accordance with the technological process of manufacturing a part to its material and purpose. The instability of physical and mechanical properties is clearly presented on the example of one steel grade, but with different methods of obtaining the workpiece and the material in as-received condition. The influence of heat treatment on the stabilization of the physical and mechanical properties of the material, taking into account the inheritance of properties, is studied. A model of the contact interaction of gears has been developed taking into account external and internal influences, both during preparation and under operation (material properties, engagement forces, temperature field, etc.). The cumulative model, focused on the reaction of the structural material in machining and interaction in work, summarizes a functional use, physical and mechanical properties and features of behavior in operating conditions. The control of the operational properties of gears is presented in an inseparable connection with technology and their materials such as structural state and physical and mechanical properties.

Keywords: gas turbine aircraft engine, gear wheel, physical and mechanical properties, structural material, hardened material of the surface layer, the core of the material

For citation: Bezyazichniy V.F., Shekhovtseva E.V. Engineering support for the manufacture of gears of aviation gas turbine engines providing for the instability of the physical and mechanical properties of their materials / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 8 (146). P. 35–42. doi: 10.30987/2223-4608-2023-35-42

Конструкционная сталь имеет наибольшую продолжительность службы в изделиях авиационной, судовой и промышленной технике. При эксплуатации зубчатых механизмов, передающих крутящий момент, требуется – высокая прочность, твердость, сопротивление усталостным нагрузкам при значительном ресурсе наработки узла. В связи с этим является актуальным изучение нарушения работоспособности и выхода из строя зубчатых передач, как на базе работ ученых Старжинского В.Е., Гольдфарба В.И., Морозовой Л.В., Wang Q.J. и других [1 – 6] документов [7], так и личного опыта [8] при статистическом анализе большого объема практических данных по эксплуатации приводов газотурбинных двигателей (ГТД) авиационной, морской и наземной тематики. Статистика повреждений зубчатых колес (рис. 1) иллюстрирует, что около 80 %

нарушений работоспособности зубчатых передач возникает из-за усталостных проявлений при циклическом характере нагружения.

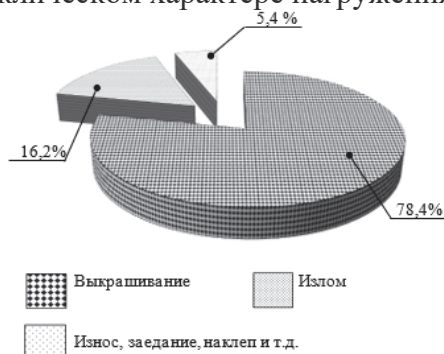


Рис. 1. Статистика повреждений зубчатых колес

Fig. 1. Gear wheel damage statistics

Это аргументирует важность методологического обоснования долговечности зубчатых колес с учетом стабильности свойств конструкционных сталей и технологической

преимущества процесса изготовления шестерен, основываясь на работах А. С. Васильева, М. Л. Хейфец, А. Г. Сулова, Е. С. Елисеева, В. В. Крымова и др. [9 – 12]. Проблема нестабильности физико-механических свойств конструкционных материалов подробно изложена в работах В. К. Старкова, А. П. Яковлевой, Л. В. Савельевой, В. В. Крымова [10, 13 – 14]. Доказано, что нестабильность физико-механических свойств материалов составляет более 40 %, а стабильность этих свойств важна для обеспечения работоспособности изделий [13].

Это приводит к необходимости более достоверного определения эксплуатационных свойств деталей, зависящих от физико-механических свойств материала из которого они изготовлены, начиная с их проектирования, а также обуславливает большой интерес к проблеме технологического обеспечения изготовления зубчатых колес ГТД при циклическом нагружении, которое связано с учётом физико-механических свойств материала и их стабильности.

Качество материала детали и его физико-механические свойства зависят от технологического процесса ее изготовления. Деталь состоит из поверхностного слоя, содержащего поверхность, сформированную механической обработкой, шлифованием с учетом химико-термической обработки, и слоем основного материала.

Эксплуатационные свойства зубчатых колес (контактная и изгибная прочность, износостойкость, коррозионная стойкость и др.) зависят от качества поверхностного слоя рабочих поверхностей сопрягаемых деталей. При разработке, расчете и производстве зубчатой передачи для его работоспособности значительное внимание уделяется технологической наследственности изготовления.

Эксплуатационные свойства зубчатой передачи формируются в рамках двух основных процессов системы менеджмента качества, которые дополняют друг друга:

– на этапе проектирования и разработки (с последующим отражением в конструкторской документации) зубчатого зацепления назначаются материал, точность изготовления, качества рабочих поверхностей и сердцевины материала, обеспечивающие требуемые параметры норм прочности. Расчетчик использует зависимости прочностных показателей с физико-механическими свойствами материалов шестерен, параметрами качества рабочих поверхностей и условиями эксплуатации. Напряжения в зубчатом зацеплении зависят от геометрии профиля, свойства материала и

обработки, в том числе габаритов, величины зазора в соединении и степени точности;

– на этапе технологической подготовки производства при выпуске пакета технологической документации. Технолог задает виды, способы и условия производства шестерен с учетом требуемой точности обработки и показателей качества рабочих поверхностей. На совокупность свойств поверхностного слоя рабочих поверхностей зубчатых колес первоначально влияет механическая обработка. И технологический процесс обработки шестерни должен формироваться с учетом поводки детали после химико-термической обработки и параметров сердцевины для обеспечения качества.

По функциональному назначению эксплуатационные свойства зубчатых колес включают в себя показатели выносливости на контакт и изгиб, износостойкость и коррозионную стойкость. Следовательно, технологическая наследственность качества поверхностного слоя рабочих поверхностей представляет собой систему связей от комплекса прочностных и технологических параметров, а эксплуатационных свойств от качества поверхностного слоя, что представлено на рис. 1:

$$\begin{cases} P_{\text{П}} = f(K_{\text{ПС}}, P_{\text{Т}}); \\ T_{\text{Н}}^{\text{ЭС}} = f(K_{\text{ПС}}), \end{cases} \quad (1)$$

где $P_{\text{П}}$ – показатели прочности; $K_{\text{ПС}}$ – качество поверхностного слоя; $P_{\text{Т}}$ – параметры технологические; $T_{\text{Н}}^{\text{ЭС}}$ – технологическая наследственность эксплуатационных свойств.

Технологический процесс производства детали формирует физико-механические свойства материала и соответствующие им прочностные параметры. Изменение свойств, начиная от исходного состояния полуфабриката материала ($S_{\text{И}}$ – исходные свойства материала) при производстве до получения окончательно готовой детали ($S_{\text{Э}}$ – эксплуатационные свойства материала) необходимо анализировать с точки зрения технологической наследственности, т. к. качество детали формируется всеми операциями технологического процесса. Конечно, в разных долях.

Управление влиянием каждой отдельной операции технологического процесса изготовления детали на изменение свойств материала с учетом тенденций современного производства и особенно внедрения концепции цифрового двойника на производстве делает

возможным учет взаимодействия операций через коэффициент наследования [11]:

$$K_{CB} = \frac{C_i}{C_{i-1}}, \quad (2)$$

где K_{CB} – коэффициент наследования свойств материала; C_i – значение свойства материала на текущей операции; C_{i-1} – значение свойства материала на предшествующей операции (исходное состояние – для заготовки).

Коэффициент наследования свойств материала определяет положительную ($K_{CB} > 1$) или отрицательную ($K_{CB} < 1$) эволюцию свойств на данной операции относительно их значений на предшествующей операции или в состоянии поставки.

В табл. 1 проведены экспериментальные исследования механических свойств материала зубчатых колес – на примере образцов из стали 18X2H4MA – применительно к различным методам получения заготовки, как исходное состояние, с последующей термической обработкой. Представленное сравнение механических свойств материала при различном методе получения заготовки доказывает, что вид заготовки существенно влияет на механические свойства материала, и наглядно показывает нестабильность его свойств, как с учетом исходного состояния материала, так и последующей термической обработки. В табл. 2 определены величины наследственности механических свойств конструкционной стали на примере двух последовательных операций – заготовительная и термическая обработки.

1. Механические свойства стали 18X2H4MA для различных заготовок

1. Mechanical properties of 18X2N4MA steel for various piece parts

Наименование операции		Механические свойства	
Заготовительная	Термическая	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа
Прутки сортовой	—	997	1158
Поковка		1020	1182
Штамповка		1032	1205
Прутки сортовой	Нормализация и высокий отпуск	741	901
Поковка		760	923
Штамповка		785	950

2. Коэффициент наследования свойств стали 18X2H4MA при сопоставлении механических свойств заготовок, полученных разными способами

2. The coefficient of inheritance of the properties of steel 18X2H4MA when comparing the mechanical properties of workpieces obtained by different methods

Наименование операции		Коэффициент наследования K_{CB} по параметрам	
Заготовительная	Термическая	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа
Прутки сортовой	Нормализация и высокий отпуск	0,743	0,778
Поковка		0,745	0,781
Штамповка		0,761	0,788

Изготовление зубчатых колес из сортового прутка формирует растягивающие напряжения, которые при эксплуатации суммируются с напряжениями, возникающими при изгибе зуба под действием сопряженного колеса. Они направлены поперек волокон материала и способствуют снижению работоспособности деталей. Следует отметить, что метод обработки давлением не только формирует волокна материала, направленные вдоль зуба относительно наибольших растягивающих напряжений в зубьях, но и благоприятно влияет на производительность механической обработки детали. Последующая

нормализация образует структуру материала с измельченным зерном. В совокупности данные мероприятия положительно влияют на механические свойства материала и работоспособность детали, увеличивая его прочностные показатели.

Широкий ассортимент полуфабриката сортового проката, марок конструкционных сталей и способов обработки содействуют тому, что металлопрокат из стали – это высоко востребованный материал для современных элементов металлических конструкций и механизмов, которые эксплуатируются при различных нагрузках,

климатических и других условиях. Следовательно, долговечность готового изделия из сортового проката нельзя оценивать только по свойствам полуфабриката.

Оценка коэффициента наследования механических свойств материала показывает целесообразность проведения термической обработки и ее позитивное влияние на механические свойства материала, на примере стали 18Х2Н4МА, как для обеспечения наилучших свойств обрабатываемости резанием, так и для сокращения нестабильности механических свойств материала. Отмечается стабилизация по пределу прочности более 18 %, а по пределу текучести – более 11 %. Это подтверждает и коэффициент наследования свойств материала.

При эксплуатации зубчатой передачи зубья пересопрягаются между собой. При этом ведущее звено (шестерня) увлекает за собой ведомое (колесо). На этапе проектирования с учетом эксплуатационных норм по зубчатым зацеплениям предъявляют высокие требования к качеству материала, рабочей поверхности и сердцевине материала, точности обработки. В связи с этим материал, из которого изготавливают зубчатые колеса, должен обладать такими свойствами, как сопротивление явлениям усталости с возможностью воспринимать значительные нагрузки рабочей поверхностью без разрушения определенное число циклов. Таким образом, материал зубчатых колес должен обеспечить необходимый и достаточный предел выносливости согласно требуемого ресурса наработки. Зубчатые колеса в обязательном порядке проходят термическую обработку, а зубчатые передачи силовых приводов – химико-термическую обработку.

Зуб силовой зубчатой передачи (рис. 2) состоит из рабочей поверхности, включающей в себя поверхность 1 контакта и упрочненный слой 2, и сердцевины 3 материала шестерни. Каждый элемент зуба (поверхность 1, упрочненный слой 2 и сердцевина 3) характеризуется физическими, механическими и технологическими свойствами материала, как упрочненного слоя, так и сердцевины. Именно физико-механические свойства каждого слоя материала и их сочетание определяют восприимчивость детали к силовым циклическим нагрузкам. Обрабатываемость конструкционных сталей характеризуются технологическими свойствами материалов подвергаться различным видам обработки. Природа этих характеристик заключается в физико-механических свойствах материалов, влияющих на технологичность заготовок и деталей, а также стратегию обработки детали.

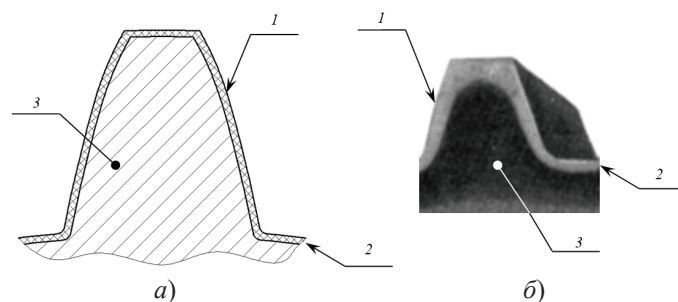


Рис. 2. Составляющие материала зуба:

а – схематичное изображение; б – упрочненный слой детали

Fig. 2. Components of the tooth material:

а – schematic image; б – hardened layer of the part

При этом физико-механические свойства материала в состоянии поставки широко представлены в литературе, а физико-механические свойства поверхностного слоя и сердцевины детали, которые, по сути, после химико-термической обработки детали значительно отличаются от целостных полуфабрикатов в состоянии поставки, требуют изучения и систематизации знаний.

Рабочие условия зубчатых зацеплений при передаче крутящего момента при циклическом от нулевом нагружении характеризуются трением скольжения при наличии определенных скоростей, силовой нагрузки и температуры, особенно в зоне контакта. Условия эксплуатации зубчатого зацепления требуют обязательной подачи смазочной жидкости в зону контакта. Выделяют два способа подвода смазочной жидкости в зону контакта:

- погружение – масло заполняет картер корпуса на определенную величину;
- принудительная смазка через жиклеры и систему трубопроводов маслосистемы.

В процессе работы в зоне контакта при сопряжении зубьев вырабатывается энергия в результате трения зубьев шестерен. Для охлаждения зоны контакта для защиты от теплового потока подается смазочная жидкость – масло. Это необходимо в виду того, что чрезмерное тепло в зоне контакта может вызвать изменения структурно-механических свойств рабочих поверхностей зубьев. Увеличения данных изменений негативно сказывается на эффективности отведения тепла в сопрягаемой зоне. Повреждения рабочих поверхностей в зоне контакта при трении негативно влияют на процесс охлаждения.

Следовательно, в модели контактного взаимодействия зубьев можно выделить базовые рабочие условия зубчатого механизма: тепловое поле в зоне контакта; материал шестерен; силовая нагрузка в зубчатом зацеплении.

Затем анализируем факторы использования зубчатой передачи – эксплуатационные,

конструкционные, технологические и механические (рис. 3).

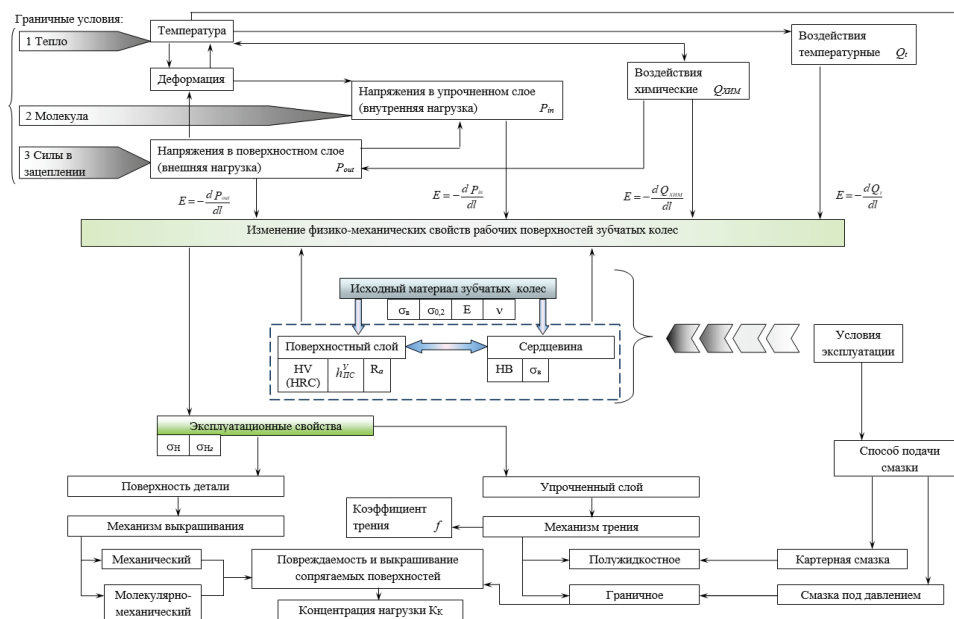


Рис. 3. Структурно-причинная модель контактного взаимодействия зубчатого зацепления

Fig. 3. Structural-causal model of the contact interaction of the gearing

Структурно-причинная модель контактного взаимодействия зубчатого зацепления демонстрирует физику вращательного движения зубчатых колес. На рис. 3 приняты следующие обозначения: P_{out} – напряжения в поверхностном слое (внешняя нагрузка); P_{in} – напряжения в упрочненном слое (внутренняя нагрузка); $Q_{хим}$ – энергия химического взаимодействия; Q_t – энергия теплового поля; E – мера интенсивности воздействия; dP_{out} , dP_{in} , $dQ_{хим}$, dQ_t – работа соответствующего параметра; dl – длина пути зацепления; σ_B – предел прочности при растяжении; $\sigma_{0.2}$ – предел текучести; E – модуль упругости материала детали; ν – число Пуансона; HV (HRC) – твердость материала поверхностного слоя; $h_{ПС}^y$ – глубина упрочненного слоя; R_a – шероховатость рабочих поверхностей; $HВ$ – твердость сердцевины; σ_H – контактные напряжения; $\sigma_{HТ}$ – глубинные контактные напряжения; f – коэффициент трения; K_k – концентрация нагрузки.

В процессе эксплуатации рабочие поверхности зубьев шестерен подвергаются не только механическому, но и молекулярному воздействию в зоне контакта рабочих поверхностей. При передаче крутящего момента материал деталей в зоне контакта поверхностей сжимается под действием сил, а до и после зоны контакта растягивается в результате упругопластических деформаций. Работа зубчатой передачи характеризуется площадью контакта рабочих поверхностей. Площадь контакта сопрягаемых зубьев определяют параметры

профилей, физико-механические свойства материала шестерен (модуль упругости, твердость, предел прочности и др.), а также напряжения в поверхностном и упрочненном слоях, механизм трения и повреждаемости. Физическая сущность эксплуатации зубчатых колес заключается в том, что при пересопряжении зубьев механизма в зоне их контакта образуются механические и молекулярные процессы, которым сопутствуют тепловые, окислительные и другие явления.

Тепловое поле в зоне контакта может оказывать влияние в первую очередь на физико-механические свойства поверхностного упрочненного слоя, а потом и на физико-механические свойства сердцевины материала шестерен. Поверхностный упрочненный слой материала при росте температуры в зоне контакта имеет склонность к охрупчиванию или упрочнению при росте температуры и это вызвано технологией производства деталей. Влияние теплового поля до 90 °С с его быстротечностью на макро- и микроструктуру, физико-механические свойства материала несущественно с учетом достаточности охлаждения и смазки зоны контакта. Наиболее часто применяемым смазочным средством для зубчатых колес ГТД служит масло авиационное МС-8П по ОСТ 38.01163-78 или его аналог по физико-механическим и химическим свойствам масло для судовых газовых турбин по ГОСТ 10289-79. Служебные свойства масла сохраняются до 120 °С.

Увеличении температуры рабочей среды выше 120 °С приводит к окислительным

процессам и нарушению целостности рабочих поверхностей в результате адгезии сопрягаемых поверхностей. Это влечет прирост сил в зацеплении и ухудшает условия трения, и как следствие – структурно-механические изменения материала в упрочненном слое.

В целом, тепловое поле в зоне контакта сопрягаемых зубьев изменяет условия сопряжения деталей с определенными метаморфозами механических свойств упрочнённого слоя детали. Так, например, под действием сил в зацеплении и тепла в зоне контакта поверхностный слой материала под влиянием пластической деформации становится мягче. При температурном поле более 200 °С снижается предел текучести материала при небольшом увеличении предела прочности при снижении свойств используемых масел. Это требует применения более прочных конструкционных материалов, а иногда и увеличения габаритов передачи.

Зубчатые колеса ГТД изготавливаются из высоколегированных сталей. И для обеспечения требуемой прочности в сочетании с необходимой пластичностью зубчатые колеса проходят обязательную химико-термическую обработку. Именно химико-термическая обработка, формирующая упрочненный поверхностный слой, создает возможность зубчатым передачам работать при относительно высокой температуре (до 120 °С) в зоне контакта при подаче масла для отвода тепла.

Также рабочая поверхность зубьев с упрочненным слоем, достаточно твердым и необходимой толщины, обладает выносливостью относительно достаточно высоких усилий без каких-либо деформаций и повреждений контактирующих поверхностей. Грамотно назначенная и технологически правильно выполненная химико-термическая обработка – это гарантия успешного функционирования зубчатой передачи в сочетании с относительно мягкой сердцевиной материала зуба.

Анализируя взаимодействие зубьев при передаче крутящего момента, в зоне контакта возникают силы нормальные и касательные, которые создают напряжения на поверхности и в упрочненном слое с определенной концентрацией нагрузки по профилю. В зоне контакта происходит деформирование слоев материала, сопровождающееся тепловым полем, которое, при стечении определенных обстоятельств, приводит к нарушению целостности структуры рабочей поверхности, и, как следствие, к увеличению контактных напряжений. Стечением определенных обстоятельств можно считать последовательность действий, которые следуют друг за другом – увеличение тепла в зоне контакта изменяет химическое взаимодействие поверхностей, влечет модификацию механических свойств материала и сил в зацеплении.

Это приводит к изменению эксплуатационных свойств материалов зубчатых колес в сопрягаемой зоне. При нарушении условий эксплуатации

зубчатых колес процессы, протекающие в зацеплении при пересопряжении зубьев, могут «мутировать» свойства материала, в первую очередь, рабочей поверхности, созданные при изготовлении детали. И в консервативном случае могут привести к повреждению поверхности.

Систематизация воссоздания управления контактным взаимодействием зубьев в рамках структурно-причинной модели с отражением эксплуатационных, конструктивных и технологических процессов работы зубчатого механизма, а также физико-механических свойств материала сердцевины и упрочненного слоя, которые формируются при изготовлении деталей, изображена на рис. 3.

В заключение следует отметить, что определение механических свойств стали 18Х2Н4МА, как в состоянии поставки и при изготовлении различных заготовок, так и в сочетании с термической обработкой применялись серийные технологические процессы по обеспечению качества продукции. Использование метода прототипа изготовления образцов обеспечивает непредвзятость разработанного метода управления стабильностью физико-механических свойств материала детали. Наглядно представлена нестабильность механических свойств (более 20 %) конструкционного материала в базе полуфабриката, поковки и штамповки при последующей термической обработке, в том числе, для стабилизации свойств материала. На основе результатов исследований и их обработки сформирована практическая структурно-причинная модель контактного взаимодействия зубчатых колес с аргументированной методикой по управлению стабильностью физико-механических свойств материала, позволяющая учесть параметры и упрочненного рабочего слоя, и сердцевины материала с учетом технологической наследственности изготовления детали, что возможно воплотить на производстве в рамках концепции цифрового двойника.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Титов В.И., Тарасенко Л.В., Уткина А.Н., Шалькевич А.Б. Фазовый анализ новой композиции высокопрочной конструкционной стали // Заводская лаборатория. 2015. Т. 81, № 2. С. 35–39. ID: 23024391.
2. Орлов М.Р., Оспенникова О.Г., Наприенко С.А., Морозова Л.В. Исследование усталостного разрушения конических шестерен редуктора центрального привода газотурбинного двигателя, изготовленных из стали 20Х3МВФ // Деформация и разрушение материалов. 2014. № 7. С. 18–26. ID: 21716093.
3. Морозова Л.В., Орлов М.Р. Исследование причин разрушения зубчатых колес в процессе эксплуатации // Авиационные материалы и технологии. 2015. № S1. С. 37–48. ID: 24722080.
4. Rudenko S.P., Val'ko A.L. Contact fatigue resistance of carburized gears from chromium-nickel steels // Metal science and heat treatment. 2017. Vol. 59, iss. 1-2. P. 60–64. ID: 31036421.

5. Туманов, Н.В., Воробьев, Н.А., Калашникова, А.И., Калинин, Д.В., Кожаринов, Е.В. Комплексная фрактодиагностика авиационных конических зубчатых колес // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 2. С. 55–63. ID: 32494588.

6. Старжинский В.Е., Гольдфарб В.И., Шилько С.В., Шалобаев Е.В., Тескер Е.И. Развитие терминологии в области зубчатых передач и трансмиссий. Часть 3. Идентификация понятий по видам повреждений зубчатых колес // Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение. 2017. Т. 15. № 3. С. 51–61. ID: 29991991.

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

8. ANSI/AGMA 1010-F14. Appearance of Gear Teeth – Terminology of Wear and Failure. Alexandria, USA. 2014. 89 p.

9. Шеховцева Т.В., Шеховцева Е.В. Особенности повреждения рабочих поверхностей зубчатых колес ГТД // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 6. С. 406–416. ID: 41117325.

10. Хейфец М.Л., Васильев А.С., Кондаков А.И., Танович Л. Технологическое управление наследованием эксплуатационных параметров качества деталей машин // Вестні нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. 2015. № 3. С. 10–22. ID: 24339707.

11. Суслов А.Г. Развитие учения о контактной жесткости и инженерия поверхности деталей машин // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 11 (72). С. 12–17. ID: 36557013.

12. Фомина Л.П., Крымов В.В. Совершенствование технологий упрочнения зубчатых колес авиадвигателей // Двигатель. 2016. № 2 (104). С. 6–8. ID: 26211047.

13. Антипов Д.В., Гушян Ю.Г., Ключков Ю.С., Елисеев Ю.С., Чекмарев А.Н. Оценка функционирования системы логистического управления качеством технологического процесса // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 4. С. 45–48. ID: 26684252.

14. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов. М.: Машиностроение, 2009. 640 с. ID: 20240788.

15. Яковлева А.П., Савельева Л.В., Наумов В.А., Шарпов С.Н., Бессуднов Л.И. Причины разрушения зубчатых колес // Главный механик. 2017. № 1. С. 43–48. ID: 29461233.

REFERENCES

1. Titov V.I., Tarasenko L.V., Utkina A.N., Shalkevich A.B. Phase analysis of new composition of high-strength structural steel. // Industrial laboratory, 2015, vol. 81, no. 2. pp. 35–39. ID: 23024391.

2. Orlov M.R., Ospennikova O.G., Naprienko S.A., Morozova L.V. Research of fatigue failure of conic gear wheels

of reducer of the central drive of the gas turbine engine, made of steel 20Kh3MVf // Deformation and destruction of materials, 2014, no. 7, pp. 18–26. ID: 21716093.

3. Morozova L.V., Orlov M.R. Research of failure causes of cogwheels in operational process. // Aviation materials and technologies, 2015, no. S1. pp. 37–48. ID: 24722080.

4. Rudenko S.P., Val'ko A.L. Contact fatigue resistance of carburized gears from chromium-nickel steels // Metal science and heat treatment. 2017. Vol. 59, issue 1–2, pp. 60–64. ID: 31036421.

5. Tumanov N.V., Vorobjeva N.A., Kalashnikova A.I., Kalinin D.V., Kozharinov E.V. Complex failure diagnosis of aviation bevel gears // Industrial laboratory. Diagnostics of materials, 2018, vol. 84, no. 2, pp. 55–63. ID: 32494588.

6. Starzhinsky V.E., Goldfarb V.I., Shilko S.V., Shalobaev E.V., Tesker E.I. Development of terminology in gearing and power transmissions. Part 3. Identification of notions on gear failure modes. // Energy, metallurgical and chemical engineering, 2017, vol. 15, no. 3, pp. 51–61. ID: 29991.

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

8. ANSI/AGMA 1010-F14. Appearance of Gear Teeth – Terminology of Wear and Failure. Alexandria, USA. 2014. 89 p.

9. Shekhovtsova T.V., Shekhovtsova E.V. The features of working surfaces damages of gears in gas turbine engines // Proceedings of the Tula State University. Technical sciences, 2019, No. 6. pp. 406–416. ID: 41117325

10. Heifets M.L., Vasiliev A.S., Kondakov A.I., Tanovich L. Technological management of inheritance of quality parameters of machine parts // Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus, 2015, no. 3, pp. 10–22. ID: 24339707.

11. Suslov A.G. Development of doctrine on contact stiffness and engineering of machinery surface // Bulletin of the Bryansk State Technical University, 2018, no. 11 (72), pp. 12–17. ID: 36557013.

12. Fomina L.P., Krymov V.V. Improvement hardening technology for aircraft engine gears. Engine, 2016, no. 2, pp. 6–8. ID: 26211047.

13. Antipov D.V., Gushyan Yu.G., Klochkov Yu.S., Eliseev Yu.S., Chekmarev A.N. Evaluation of the functioning of the system of logistics management of the quality of the technological process // Proceedings of Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 45–48. ID: 26684252.

14. Starkov V.K. Physics and optimization of cutting materials. Moscow: Mashinostroenie, 2009, 640 p. ID: 20240788.

15. Yakovleva A.P., Savelyeva L.V., Naumov V.A., Sharapov S. N., Bessudnov L.I. Causes of gear wheels damage. Glavnyy mekhanik [Chief mechanical engineer], 2017, no. 1, pp. 43–48. ID: 29461233.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.05.2023; одобрена после рецензирования 02.06.2023; принята к публикации 14.06.2023.

The article was submitted 30.05.2023; approved after reviewing 02.06.2023; assepted for publication 14.06.2023.