

УДК 621.9-229.3

Е.А. Польский, к.т.н., доц.

С.В. Сорокин, к.т.н., доц.

*Брянский государственный технический университет
г. Брянск, Россия*

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ,
РАБОТАЮЩИХ
В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ,
С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНТЕГРИРОВАННЫХ САПР**

Предложена концепция автоматизации проектных процедур выбора рациональных параметров качества, эксплуатационных характеристик поверхностных слоев деталей пар трения скольжения, работающих без смазочного материала, для обеспечения их требуемой долговечности, в условиях применения интегрированных САПР. Разработаны математические модели и алгоритмы автоматизированной системы проектирования цилиндрических узлов трения. Разработаны модели процесса принятия технических решений при проектировании и технологии изготовления узлов трения, работающих без смазки.

Введение. Работа машин и агрегатов современной техники происходит со всевозрастающими скоростями и нагрузками, при высоких и низких температурах, в вакууме. Повышаются требования к надежности и долговечности наряду со стремлением к упрощению и удешевлению разрабатываемых конструкций, к кондиционности вырабатываемых продуктов. Одной из важнейших задач создания качественных машин, способных безотказно функционировать в течение всего срока эксплуатации, является обеспечение износостойкости их сопряжений. Она особенно актуальна для узлов трения, работающих без смазочного материала, которые находят все большее применение в современных машинах.

В настоящее время задачи проектирования деталей узлов трения могут быть решены на качественно новом уровне за счет интеграции процессов автоматизации начальных этапов технической подготовки производства (ТПП) с последующим использованием полученных результатов на этапе автоматизированного проектирования с применением интегрированных САПР (CAD/CAM/CAE-систем).

Основная часть. Анализ современного подхода к проблеме обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин

технологическими методами и направлений автоматизации этапов ТПП, в частности, формализации алгоритмов принятия решений на ранних стадиях конструкторско-технологического проектирования, позволяет сделать следующие основные выводы:

- в настоящее время отсутствуют работы, в которых предпринимаются попытки комплексной автоматизации проектирования цилиндрических деталей пар трения скольжения, работающих без смазки, с целью обеспечения их требуемой долговечности – данные работы проведены только на уровне отдельных этапов проектирования: расчетов на прочность, износостойкость и др.;

- проведенные теоретические исследования в области обеспечения эксплуатационных свойств поверхностных слоев деталей пар трения накопили достаточный материал по переводу решения данных проектных задач в автоматизированный режим;

- средствами интегрированных САПР могут быть решены частные задачи проектирования цилиндрических узлов трения с целью обеспечения их требуемой долговечности, однако на сегодняшний день ни в одной из систем не существует модулей, функций которых были бы направлены на комплексное решение данных задач.

Исходя из вышеизложенного, был сделан вывод об актуальности разработки концепции, математических, информационных моделей и алгоритмов процесса автоматизации проектирования цилиндрических деталей пар трения скольжения, в условиях применения интегрированных САПР.

При проектировании обеспечения требуемой долговечности узлов трения можно выделить следующие традиционные этапы ТПП, связанные с решением задач обеспечения эксплуатационных свойств деталей пар трения:

- определение условий функционирования узла трения;
- опытно-конструкторские и технологические работы – предварительный выбор материала;
- эскизный проект и проверочные обсчеты модели на обеспечение эксплуатационных свойств;
- разработка технического задания на проектируемое изделие с окончательно определенным материалом, конфигурацией поверхностей деталей.

В соответствии с этой схемой была разработана концепция автоматизации проектирования цилиндрических пар трения скольжения, предполагающая расширение функциональных возможностей интегрированных САПР путем разработки модулей

автоматизированной системы. Согласно разработанной концепции, было определено место автоматизированной системы проектирования деталей пар трения в составе интегрированной САПР и определены основные информационные потоки, реализующие взаимосвязь между модулями интегрированной САПР и разрабатываемой автоматизированной системы (рис. 1).



Рис. 1. Автоматизированная система проектирования цилиндрических узлов трения в составе интегрированной САПР

Методически разработанную концепцию можно представить в виде процесса, в рамках которого осуществляется последовательное применение подсистем разрабатываемой автоматизированной системы.

Определение условий функционирования механизма. Результатом анализа условий эксплуатации проектируемого узла трения является формирование технического задания на проектируемое изделие, в котором отражается исходная информация (нагрузочно-скоростные характеристики работы механизма, эксплуатационные, геометрические и конструктивные, экономические, технологические и другие требования), системы проектирования деталей пар трения.

Выбор материала. В настоящей работе предлагается методика построения математической модели выбора материалов деталей при проектировании узлов трения скольжения, работающих без смазки или материала покрытия и способа его создания. Материалы

контактирующих поверхностей деталей узлов трения выбираются в зависимости от свойств рабочей среды, ее температуры и давления, от скорости скольжения, от реакции в опоре (нагрузки), от теплоотвода из зоны трения, графика межремонтных периодов и срока наработки узла на отказ. Физико-механические свойства выбранного материала являются входными данными для следующих этапов проектирования, на которых проверяется возможность обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик и параметров качества поверхностных слоев деталей.

Анализ интенсивности изнашивания и выбор метода финишной обработки. При решении задачи моделирования процесса изнашивания используется зависимость, связывающая параметры качества поверхностей трения и интенсивность изнашивания. На данном этапе определяются точностные требования к проектируемым деталям, параметры качества, а также выбираются методы технологического обеспечения эксплуатационных характеристик.

Анализ силового взаимодействия. Для пары трения «вал – втулка» в рамках рассматриваемой модели решаются следующие вопросы: определение сближения в цилиндрическом стыке за счет собственной деформации вала и втулки, определение контактной равнодействующей давления в цилиндрическом стыке, описывается закон распределения нагрузки вдоль втулки, определяется зависимость давления от приложенной нагрузки.

Определенные на третьем этапе параметры интенсивности изнашивания и силового взаимодействия деталей пар трения, наряду с исходной информацией, позволяют завершить автоматизированное проектирование узла трения скольжения анализом динамики работы механизма и его температурных характеристик.

Анализ фактической площади контакта. Для решения задачи контактирования двух твердых тел предлагается использование пространственной модели поверхностей трения, построенной на основе метода конечных элементов.

Анализ динамического взаимодействия. Известно, что все материалы в большей или меньшей степени обладают вязкоупругостью и вязкопластичностью. В рамках рассматриваемой модели используется реологическая модель Кельвина-Фойгта, отражающая свойства реальных тел.

Анализ термодинамического взаимодействия учитывает исходную температуру элемента, среднюю объемную температуру элемента (обусловленную теплопроводностью материала детали) и температуру вспышки на пятне контакта.

В соответствии с предложенной методикой автоматизированного проектирования деталей, работающих в условиях трения скольжения без смазки, созданы структурно-функциональные схемы и математические модели основных подсистем.

Для более детальной проработки положений данной методики в предлагаемой работе рассматривается проектирование автоматизированных подсистем выбора материала, моделирования изнашивания, а также математическая модель автоматизированной подсистемы анализа силового взаимодействия деталей пар трения.

Для реализации процедур выбора материалов деталей пар трения были разработаны математические модели экспертных оценок, основанные на применении метода анализа иерархий.

Исходный набор допустимых для рассмотрения материалов представляется в виде множества M_0 :

$$M_0 = \{M_k | k = 1, \dots, K_0\}, \quad (1)$$

при этом каждому M_k соответствуют предельно допустимые значения нагрузки P_i , температуры T_i и скорости скольжения V_i .

Для каждого материала выполняется процедура сравнения входной информации с множеством параметров $\{P_i, T_i, V_i\}$, которые могут обеспечить функционирование узла трения в заданных условиях. В результате указанной процедуры формируется начальное множество альтернатив A :

$$A = \{ \langle M_k, P_i, T_i, V_i \rangle | M_k \in M; P_i < P_B; T_i < T_B; V_i < V_B \} \quad (2)$$

Далее проводится ранжирование допустимых альтернатив в соответствии с уровнем их предпочтительности в условиях конкретной задачи выбора.

Дальнейшие шаги моделирования связаны с ранжированием допустимых альтернатив в соответствии с уровнем их предпочтительности в условиях конкретной задачи выбора. На предпочтительность того или иного материала, помимо условий обеспечения требуемых параметров работы узла, может влиять целый ряд дополнительных условий – коррозионная стойкость, износостойкость, предпочтительность по стоимости изготовления и обработки, прирабатываемость и др. При этом различные материалы удовлетворяют каждому из этих условий в разной степени, и увеличение предпочтительности по одному критерию часто ведет к ее уменьшению по другим. Таким образом, для построения процедуры синтеза оценок предпочтительности альтернатив необходимо привлечение методов многокритериального анализа решений. Одним из таких методов является метод анализа иерархий.

Завершается алгоритм оцениванием альтернатив по критериям, имеющим числовое выражение, и иерархическим синтезом, результатом которого является вектор обобщенных оценок предпочтительности альтернатив $C(x)$:

$$C(x) = \sum_j \lambda_j C_j(x). \quad (3)$$

В данной работе предлагается синтез экспертных оценок методом парного сравнения с количественной оценкой предпочтения по шкале Саати.

В ходе проведенной работы были разработаны математические модели выбора материалов и технологии нанесения покрытий деталей по условию предельно допустимого износа трущихся деталей.

Задача была поставлена следующим образом: определить номинальное значение толщины t_y , при котором вероятность $P(L^*, t_H)$ того, что случайная величина $t(L)$ в интервале пути трения $[0, L^*]$ не выйдет за пределы зоны допуска и достигнет максимума.

При нормальном законе распределения толщины $t(L)$, задавшись необходимой долговечностью пары трения L , при известном значении интенсивности изнашивания I_h , минимальный диаметр детали, обеспечивающий работоспособность узла трения, d_{min} , находим номинальную глубину упрочнения:

$$t_H = \frac{d_{min} + I_h L}{2}. \quad (4)$$

При решении задачи обеспечения требуемой интенсивности изнашивания I_h и параметров состояния поверхностей трения используется интерпретация зависимости, предложенной А.Г. Суловым:

$$I_h \cdot C_M = C_R, \quad (5)$$

где C_R – комплексный параметр, характеризующий зависимость интенсивности изнашивания поверхности от параметров качества поверхностного слоя:

$$C_R = \frac{(WzH \max)^{1/6}}{s_m^{1/2} \lambda (k\sigma_T)^{2/3}} Ra^{2/3} (Rp - Ra)^{1/2}; \quad (6)$$

C_M – комплексный параметр, зависящий от механических свойств материала контактирующей детали:

$$C_M = \frac{n}{43.47(p\pi)^{7/6}} \sqrt{\frac{E}{1 - \mu^2}}, \quad (7)$$

где Ra – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм; W_z – средняя высота волнистости по десяти точкам, мкм; H_{max} – максимальная величина макроотклонений формы поверхности, мкм; t_m – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии; s_m – средний шаг неровностей, мкм; λ – коэффициент, учитывающий знак и значение остаточных напряжений; σ_r – величина остаточных напряжений, МПа; k – коэффициент упрочнения; p – давление, МПа; n – число циклов воздействия до разрушения поверхностного слоя; E , μ – механические свойства материала заготовки.

Реальные условия работы узла трения описываются с помощью обобщенного коэффициента, связывающего физико-механические свойства материала деталей, нагрузочно-скоростные характеристики работы узла, графики плановых и межремонтных периодов. Определенный коэффициент сравнивается с табулированным значением комплексного параметра C_R , и таким образом выбираются методы обработки, обеспечивающие необходимую величину параметра.

Одним из исходных факторов, существенно влияющих на обеспечение требуемой долговечности, является давление. Знание реальной эпюры силового взаимодействия деталей пар трения позволяет повысить достоверность расчетов при обеспечении наработки узла на отказ. Для пары трения «вал–втулка» были решены следующие вопросы: определение сближения в цилиндрическом стыке за счет собственной деформации вала и втулки, определение контактной равнодействующей давления в цилиндрическом стыке, получен закон распределения нагрузки вдоль втулки, определяется зависимость давления от приложенной нагрузки:

$$P = \frac{80 \cdot \pi \alpha \cos(\alpha) q_0 r \cdot a^2 \sqrt{\frac{a}{3} + l}}{(\pi^2 - 4\alpha^2) \left(a^2 l + \frac{a^3}{3} + l^2 a - 4\epsilon EI \right)}, \quad (8)$$

где α – угол перекося осей вала и втулки; q_0 – максимальная нагрузка в сечении; r – номинальный радиус соединения; a , l – геометрические характеристики приложения нагрузки; E – модуль упругости; I – момент инерции сечения.

Зависимость для определения величины комплексного параметра, зависящего от механических свойств материала контактирующей детали, окончательно примет вид:

$$C_M = \frac{1.84 \cdot n}{\pi^{7/6}} \sqrt{\frac{E}{1-\mu^2}} \left(\frac{\pi \alpha \cos(\alpha) q_0 r \cdot a^2 \left(\frac{a}{3} + l \right)}{(\pi^2 - 4\alpha^2) \left(a^2 l + \frac{a^3}{3} + l^2 a - 4\epsilon EI \right)} \right). \quad (9)$$

Таким образом, при обеспечении равных значений составляющих комплексного параметра C_M , (одинаковые свойства материалов, одинаковая схема нагружения, равные условия работы узлов трения и т.д.) для достижения требуемой интенсивности изнашивания достаточно варьировать параметрами качества поверхностного слоя, входящими в параметр C_R .

Для реализации основных проектных функций автоматизированной системы с использованием представленных математических моделей было разработано информационное обеспечение, реализованное в виде автоматизированного банка данных конструкторско-технологической информации, который включает в себя следующие базы данных:

- база данных методов отделочно-упрочняющей обработки;
- база данных физико-механических свойств материалов;
- база данных материалов наносимых покрытий, технологий создания композитных изделий.

АБД содержит данные о сотнях марках материалов и десятках методах отделочно-упрочняющей обработки и способах нанесения покрытий, что позволяет применять его в виде самостоятельной информационно-поисковой системы.

На базе предложенной концепции, математических, информационных моделей и алгоритмов было разработано программное обеспечение автоматизированной системы проектирования деталей пар трения.

Выводы:

1. Разработанная общая концепция процесса автоматизации проектирования цилиндрических деталей пар трения позволяет осуществить комплексное решение задач проектирования цилиндрических узлов трения с целью обеспечения их требуемой долговечности на начальных этапах ТПП в рамках интегрированных САПР.

2. Предложена типовая модель автоматизированной системы проектирования цилиндрических пар трения скольжения, которая позволяет строить эффективные пользовательские приложения на базе различных интегрированных САПР, существенно расширяя их функциональные возможности и значительно ускоряя процесс подготовки конструкторско-технологической документации на

проектируемое изделие.

3. Принципы формализации процессов принятия проектных решений на ранних этапах ТПП, предложенные в работе, позволили создать адекватные математические модели и эффективные алгоритмы процедур выбора материалов деталей пар трения, многокритериального выбора методов отделочно-упрочняющей обработки, моделирования процесса изнашивания поверхностных слоев деталей, анализа нагруженного состояния узлов трения, выбора материалов и параметров покрытий сопрягаемых поверхностей.

4. Разработанные алгоритмы модулей автоматизированной системы проектирования цилиндрических пар трения инвариантны по отношению к интегрированным САПР, применяемым в процессе подготовки производства.

5. Разработанный автоматизированный банк данных материалов, технологических методов отделочно-упрочняющей обработки и способов создания материалопокровтий может быть использован в качестве информационного обеспечения автоматизированных систем, решающих широкий круг проектных задач.

ПОЛЬСКИЙ Евгений Александрович – кандидат технических наук, доцент Брянского государственного технического университета.

Научные интересы:

- технология машиностроения.

СОРОКИН С.В. – кандидат технических наук, доцент Брянского государственного технического университета.

Научные интересы:

- технология машиностроения.

Подано 22.08.2007