

УДК 621.8:66-5

doi: 10.18698/0536-1044-2022-11-12-24

Систематизация сопряжений деталей узлов трения машин по условиям их контакта

Ю.А. Харламов¹, А.П. Жильцов², Д.А. Вишнеvский¹,
П.А. Петров¹, А.В. Бочаров²

¹ ГОУ ВО «Донбасский государственный технический университет»

² ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

Systematization of Interfaces of Parts of Friction Units of Machines According to the Conditions of Their Contact

Y.A. Kharlamov¹, A.P. Zhiltsov², D.A. Vishnevskiy¹,
P.A. Petrov¹, A.V. Bocharov²

¹ Donbass State Technical University

² Lipetsk State Technical University

■ Процессы трения и изнашивания в значительной мере зависят от конструктивного исполнения деталей узлов трения, конструкционных материалов и технологий упрочнения, силовых, кинематических и температурных характеристик в контакте и от эксплуатационных условий. Отказавшие по износу детали классифицируют по различным признакам: функциональному назначению, материалам, видам заготовок, массе и размерам, геометрическим признакам и другим условиям изнашивания. Номенклатура таких деталей весьма обширна и охватывает как типовые, так и оригинальные конструкции. Условия эксплуатации определяют различные доминирующие виды изнашивания деталей: изменение размеров и формы поверхностей, появление царапин, рисок и задиров на сопрягаемых поверхностях, образование трещин, изнашивание, смятие и выкрошивание рабочих поверхностей, изнашивание и разрушение резьбы и др. В связи с этим необходимо классифицировать детали пар трения по условиям их контакта с целью наиболее эффективного применения методов упрочнения для повышения долговечности технической системы. Предложена система классификации сопряжений трущихся деталей, включающая в себя шестнадцать групп, различающихся геометрическими характеристиками деталей, условиями их контакта, относительного движения и изнашивания.

Ключевые слова: трибология, контактная трибомеханика, методы обеспечения износостойкости, классификация сопряжений деталей, условия изнашивания, узлы трения

■ The processes of friction and wear depend largely on the design of parts of friction units, structural materials and hardening technologies, force, kinematic and temperature characteristics in contact and on the operating conditions. Parts that have failed in terms of wear are classified according to various criteria: according to their functional purpose, materials, types and blanks, weight and dimensions, geometric features and other wear conditions. The range of such parts is very extensive and covers both standard and original designs. Operating conditions determine the various dominant types of wear of parts: changes in the size and shape of surfaces, the appearance of scratches, marks and scuffs on mating surfaces, the formation of cracks, wear, crushing and chipping of working surfaces, wear and destruc-

tion of threads, etc. In this regard, it is necessary to classify the parts of friction pairs according to the conditions of their contact in order to most effectively apply hardening methods to increase the durability of the technical system. A classification system for the interfaces of rubbing parts is proposed. It includes 16 groups of interfaces that differ in following criteria: the geometric characteristics of the parts, the conditions of the contact, the relative motion and wear.

Keywords: tribology, contact tribomechanics, methods for ensuring wear resistance, classification of parts interfaces, wear conditions, friction units

В последние годы развивается новая концепция в трибологии, где ведущее значение придается контактной трибомеханике, а основными факторами, влияющими на трение и износ, служат контактное давление и напряжение трения.

Главными на начальной стадии проектирования узлов трения являются контактные задачи с определением силовых, кинематических и температурных характеристик в контакте с учетом трения, износа и смазки. В трибологии и триботехнике развиваются научные основы методов обеспечения износостойкости и надежности узлов трения машин.

Решение этой задачи включает в себя две стадии [1–3]. Первая — разработка, применение одного или нескольких методов повышения износостойкости узлов трения. К этим методам относятся: конструктивное оформление узлов трения; материаловедческий и технологический выбор материалов сопрягаемых деталей и методов их поверхностного упрочнения; выбор смазочных материалов и присадок и методов их подачи на поверхности трения; создание принципиально новых конструкций, материалов и технологий.

Вторая стадия — обоснованная оценка эффективности выбранных методов, включая разработку математической модели процесса изнашивания узла трения. На создание таких моделей направлена большая часть трибологии как науки. Вторая стадия включает в себя следующие этапы (шаги):

- определение условий — силовых, кинематических, температурных и смазывания, — в которых работает узел; для нахождения контактного давления как основного фактора, влияющего на износ, используют решения контактных задач механики пластически и упругодеформируемого тела без учета износа (начальное состояние узла);

- выбор модели изнашивания пары трения и определение ее параметров в реальных условиях, полученных на предыдущем шаге для разных методов обеспечения износостойкости,

с проведением экспериментальных исследований;

- определение износа узла трения с помощью разных методов повышения износостойкости с использованием выбранной модели изнашивания и решение соответствующей контактной задачи для узла трения с учетом износа;

- определение надежности узла трения по износу и экономической эффективности выбранного метода повышения износостойкости.

Объекты, задачи и методы трибомеханики необходимо систематизировать [3]. Приняты следующие основные признаки систематизации:

- геометрическая форма контактирующих тел;

- свойства материалов деталей в зоне контакта: деформационные свойства материала элемента, степень неоднородности материала поверхности, остаточные напряжения, значения деформаций и перемещений, свойства третьего элемента (третьего тела) и внешней среды, условия скольжения и изнашивания (модель изнашивания) в зоне контакта;

- силовые нагрузки (их виды и скорость приложения, цикличность нагружения);

- кинематические условия взаимодействия контактирующих тел, подразделяемые по видам движения и закрепления подвижного элемента;

- тепловые условия контактирования, различные по граничным условиям тепловой задачи и условиям теплообразования, распределения теплоты в контакте;

- форма постановки краевых контактных задач (их тип и размерность), вид системы координат, вид дифференциальных уравнений равновесия, вид условий сплошности, вид физических уравнений основных элементов, вид физических уравнений третьего тела, постановка задачи с помощью функций Грина, вариационная постановка контактных задач, форма постановки задачи (прямая, обратная, оптимизационная), форма разрешающих уравнений;

- методы решения контактных задач с определением давлений и размеров площадки контакта;

- методы решения краевых задач с выявлением напряженного состояния в зоне контакта;

- численные, экспериментальные и приближенные методы определения приближенного состояния;

- конечные результаты и форма их представления: искомые параметры по площадке контакта (механические, термодинамические, энергетические, трибологические), искомые параметры в зоне контакта (на глубине), форма представления результатов.

Отказавшие в результате изнашивания детали классифицируют по следующим признакам: функциональному назначению, материалам, видам заготовок, массе и размерам, геометрическим характеристикам и другим условиям изнашивания. Детали оборудования подвержены различным видам изнашивания: механическому, термомеханическому, усталостному, коррозионному, эрозионному и др.

Изнашивающие воздействия влекут за собой образование дефектов. При этом условия эксплуатации определяют различные доминирующие виды изнашивания, типичные для тех или иных деталей: изменение размеров и формы поверхностей; появление царапин, рисок и задиров на сопрягаемых поверхностях; возникновение трещин; износ, смятие и выкрошивание рабочих поверхностей; износ и разрушение резьб и др. [4].

Создание эффективных узлов трения связано с обеспечением рациональных условий изнашивания сопрягаемых поверхностей трения деталей с учетом многочисленных факторов. Эти факторы определяют выбор материалов сопрягаемых деталей, конструктивное оформление узлов трения, обеспечение рационального нагружения элементов пар трения, соответствующую защиту поверхностей трения от внешней среды и других нежелательных воздействий, создание рационального теплового режима путем оптимизации тепловыделения и отвода тепла, геометрическую оптимизацию пар трения и др.

Все это обусловило очень большое разнообразие конструкций узлов трения, триботехнических материалов, средств их контроля и др. Поэтому систематизация и обобщение теории и практики на основе классификации условий изнашивания сопряжений деталей машин является актуальной задачей.

При проектировании новых и совершенствовании существующих конструкций машин оценка их долговечности по износу находит ограниченное применение. Методы физического и математического моделирования процессов изнашивания разработаны главным образом для ограниченного ряда типовых деталей и узлов трения. Более широко используют экспериментальное моделирование трения и изнашивания. Совершенствование узлов трения требует больших затрат и проведения многоступенчатых научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

В последние годы большое внимание уделяется созданию научно-методических баз данных технологического обеспечения эксплуатационных свойств восстанавливаемых деталей [5]. В известных работах систематизация результатов производственного опыта и научных исследований по изнашиванию деталей оборудования выполнена по типам деталей и физическим механизмам изнашивания.

При этом не учитывалась неравномерность изнашивания деталей и их поверхностей вследствие неравномерного распределения удельных давлений и скоростей относительного скольжения, различных условий смазывания, интенсивности поступления в зону трения абразивов и агрессивной среды, организации удаления частиц изнашивания и других условий в контакте деталей.

Это чрезмерно затрудняет создание и совершенствование баз данных, их использование при технологической подготовке восстановления деталей и внедрение новых эффективных технологий для их восстановления и упрочнения.

Процессы трения и изнашивания в значительной мере зависят от конструктивного оформления узлов и деталей, выбранных конструкционных материалов и технологии упрочнения, а также от эксплуатационных условий.

Проектирование оптимальных и совершенствование существующих конструкций изнашиваемых деталей и узлов, регламентирование режимов их эксплуатации, прогнозирование ресурса и технического состояния во времени невозможно провести без соответствующих расчетов. Многообразие конструкций и условий их эксплуатации требует классификации деталей и узлов трения по типовым группам и создания соответствующих типовых моделей расчета на износ.

Цель работы — систематизация деталей и узлов трения машин, доступная для использования конструкторами и технологами, не требующая глубоких специфических знаний в сфере трибологии, но позволяющая обобщать опыт разработки и эксплуатации эффективных узлов трения, обеспечения их высокой износостойкости и надежности.

Результаты исследования. Износ деталей и их сопряжений служит геометрическим критерием потери начальных показателей и выходным параметром, влияющим на надежность машин и механизмов. Актуальным направлением развития технологии ремонтного производства является создание информационных моделей, способствующих разработке рациональных технологических процессов восстановления деталей и обеспечению технологичности конструкций с учетом условий их эксплуатации, характера отказов и закономерностей износа.

Трибология как наука о трении и изнашивании изучает процессы, протекающие на локальных участках поверхностей на микроуровне. На этом уровне осуществляют моделирование трибологических явлений с целью выявления физических механизмов изнашивания ограниченных сочетаний пар материалов и условий трения [6].

Широкое применение находят стендовые и эксплуатационные испытания деталей и узлов трения, развиваются методы математического моделирования. Тем не менее до сих пор нет достаточно надежных моделей для расчета на износ даже типовых деталей машин.

Модели процессов трения и изнашивания — сложные и неоднородные [7] — требуют применения методов, основанных на учете явлений механики, химии, теплофизики, материаловедения, физики и химии поверхности твердого тела и других научных дисциплин.

При моделировании учитывают режимы работы пар трения, физико-механические свойства материалов, конструктивные особенности узлов и деталей, а также микро- и макрогеометрию поверхностей контакта.

Для развития и совершенствования методов расчета и оценки износа основных видов деталей и узлов машин металлургического комплекса их необходимо систематизировать. Известна классификация типовых сопряжений деталей машин с фиксированным направлением относительно сближения и с самоустанавли-

вающимися при изнашивании деталями [6], однако она не учитывает все возможные сопряжения деталей.

По условиям изнашивания контактирующих поверхностей сопряжения деталей можно разбить на шестнадцать групп (см. таблицу). Каждую группу можно подразделить на подгруппы по наличию промежуточных веществ в контакте взаимодействующих деталей: 1) без промежуточных веществ; 2) твердый смазочный материал; 3) смазочный материал (жидкий или пластичный); 4) абразивосодержащая среда; 5) агрессивная среда; 6) специальные сопряжения, работающие в условиях трения в вакууме, при высоких и низких температурах и пр. Также в зоне контакта могут присутствовать различные промежуточные вещества.

Особую проблему представляет обеспечение работоспособности узлов сухого трения, работающих без жидкой и пластичной смазок. Это обусловило создание твердых смазывающихся и самосмазывающихся материалов и покрытий. Для повышения долговечности смазывающие покрытия наносят на деталь, имеющую меньший путь трения скольжения. Существует возможность создания конструкций с непрерывно возобновляющимися покрытиями с ротапринтным способом подачи твердой смазки.

Основной материал исследования. Основными показателями качества поверхностей трения являются: макроотклонения (точность) размеров и формы (отклонения от плоскостности, цилиндричности и др.), волнистость, шероховатость, остаточные напряжения, структуры основного материала детали и поверхностного слоя, текстура микрорельефа поверхности (направление следов обработки, наличие специального маслоудерживающего рельефа и пр.) [8].

Исходные показатели качества поверхности в процессе трения изменяются [9]. Исключение составляют остаточные напряжения и структура основного материала, которые могут сохраняться до полного разрушения трущихся поверхностей деталей.

Шероховатость и структура поверхностного рельефа, как правило, существенно меняются при приработке. Волнистость и структура поверхностных слоев детали изменяются при установившемся изнашивании. Геометрическая форма поверхности трения остается в пределах допустимых значений, принятых при изготовлении, практически до конца срока службы

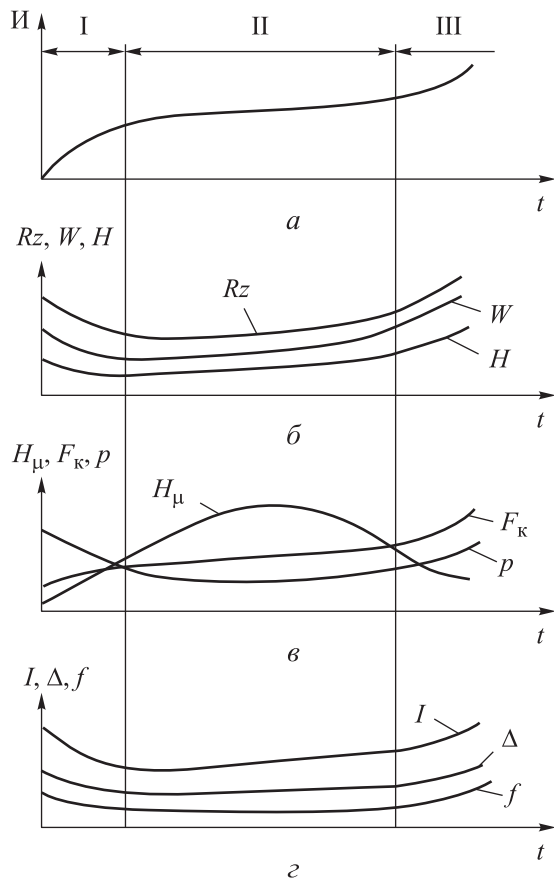


Рис. 1. Изменение во времени t исходных показателей качества поверхностей трения и выходных параметров триботехнической системы на участках приработки (I), нормального (II) и форсированного (III) изнашивания:
 а — износа I ;
 б — шероховатости Rz , волнистости W , точности размеров и формы H ;
 в — микротвердости H_{μ} , фактической площади контакта F_k и давления p ;
 з — интенсивности изнашивания I , комплексного показателя шероховатости Δ и коэффициента трения f

узла трения, если его работоспособность оценивается по параметрам точности.

Изменение во времени исходных показателей качества поверхностей трения и выходных параметров триботехнической системы на

участках приработки, нормального и форсированного изнашивания показано на рис. 1. В качестве выходного параметра рассмотрен размер поверхности трения. Однако встречаются случаи, когда работоспособность состояния поверхности трения определяют такие параметры, как шероховатость, текстура микрорельефа, форма изношенной поверхности и др.

Первая и вторая группы сопряжений деталей характеризуются одинаковыми условиями изнашивания в точках поверхностей, расположенных на одной траектории. Интенсивность, продолжительность изнашивания и износ на окружности определенного радиуса каждой из поверхностей будут одинаковыми.

Однако при наличии дополнительных факторов, связанных с конструктивными особенностями (организацией теплоотвода и подачи смазки, удалением частиц износа из зоны трения и др.), режимами эксплуатации, внешними воздействиями и пр., условия изнашивания могут изменяться, что потребует классификации по признакам нижних уровней.

Методы инженерии поверхности позволяют создавать на поверхностях трения упрочненные слои с переменными свойствами и толщиной [10]. Поэтому целесообразно разрабатывать не методы расчета на износ, а рекомендации, способствующие конструированию деталей и выбору технологий упрочнения поверхностей для более равномерного износа поверхностей трения.

К первой группе сопряжений относятся конические тормоза, фрикционные муфты, торцевые уплотнения, осевые подшипники скольжения, шестеренные насосы (боковые стенки их корпуса и торцевые поверхности шестерен) и др. Примерами второй группы являются запорные прецизионные пояски деталей соответствующей арматуры, диски фрикционных муфт, шаровые и конусные краны и др.

Классификация сопряжений деталей машин по условиям изнашивания

Группа	Условия изнашивания	Примеры сопряжений деталей
1	Вращательное движение с контактированием двух деталей и проскальзыванием (в контакте) в условиях касания; коэффициент взаимного перекрытия $K_{вз} = 1$; одинаковые условия изнашивания для каждого из тел	Конические тормоза, фрикционные муфты, торцевые уплотнения, осевые подшипники скольжения, шестеренные насосы (торцевые поверхности шестерен и боковые стенки корпуса насоса), осевые сопряжения рабочих колес лопастных насосов, плоские подпятники

Продолжение таблицы

Группа	Условия изнашивания	Примеры сопряжений деталей
2	Вращательное движение с контактированием двух деталей и проскальзыванием (в контакте) в условиях самоустановки; $K_{вз} = 1$; одинаковые условия изнашивания для каждого из тел	Диски фрикционных муфт, пробковые, шаровые и конусные краны, сферические подпятники
3	Вращательное, поступательное или сложное движение с контактированием двух деталей и проскальзыванием (в контакте) в условиях касания; $K_{вз} < 1$; постоянные условия изнашивания для всех точек, лежащих на данной траектории, для одного тела	Ходовой винт — гайка, колодочные тормоза с жестким закреплением колодки, шестеренные насосы (контакт их корпуса и головок зубьев), контакт заготовок с инструментом при дорновании, толкатели в направляющих втулках
4	Вращательное, поступательное или сложное движение с контактированием двух деталей и проскальзыванием (в контакте) в условиях самоустановки; $K_{вз} < 1$; постоянные условия изнашивания для всех точек, лежащих на данной траектории, для одного тела	Вал — подшипник скольжения, осевые опоры скольжения с самоустанавливающимися несущими поверхностями (колодками), колодочные тормоза с самоустановкой колодок, круговые направляющие скольжения при эксцентричной нагрузке, центробежные колодочные муфты, тормозные диски, дисковые тормоза, цилиндрические шарниры
5	Поступательное или возвратно-поступательное движение в низших кинематических парах; условия изнашивания не сохраняются постоянными для всех точек обоих тел; условия касания; $K_{вз} \ll 1$	Штоки, плунжеры, цилиндрические поступательные направляющие скольжения, золотниковые пары в гидрораспределителях, линейные подшипники скольжения
6	Поступательное или возвратно-поступательное движение в низших кинематических парах; условия изнашивания не сохраняются постоянными для всех точек обоих тел; условия самоустановки; $K_{вз} \ll 1$	Поступательные направляющие скольжения с плоскими начальными поверхностями, кулиса — камень, пластины — корпус и пластины — ротор в пластинчатых насосах и гидромоторах, пазы полумуфт и выступы промежуточного диска крестовых муфт, пружинно-кулачковые предохранительные муфты
7	Вращательное, поступательное или возвратно-поступательное движение в высших кинематических парах; условия изнашивания не сохраняются постоянными для всех точек обоих тел; условия касания; $K_{вз} \ll 1$	Зубчатое зацепление, кулачок — толкатель, шестеренные насосы (зубья шестерен)
8	Вращательное, поступательное или возвратно-поступательное движение в высших кинематических парах; условия изнашивания не сохраняются постоянными для всех точек обоих тел; условия самоустановки; $K_{вз} \ll 1$	Колесо — рельс, подшипники и направляющие качения, обгонная фрикционная роликовая муфта, фрикционные катки, шариковые винтовые механизмы
9	Вращательное движение в условиях контакта со всесторонним сжатием; условия касания или самоустановки	Сальниковые уплотнения с мягкой набивкой, манжетные уплотнения, эластичные втулки, кольца — пробки, сальниковые цепи

Окончание таблицы

Группа	Условия изнашивания	Примеры сопряжений деталей
10	Возвратно-поступательное движение в условиях контакта со всесторонним сжатием; условия касания или самоустановки	Сальниковые уплотнения с мягкой набивкой валов, манжетные уплотнения, эластичные втулки, кольца — пробки, поршневые кольца — гильза цилиндра, плунжеры с уплотнениями, устьевые герметизаторы штангового насоса
11	Подвижные сопряжения деталей, контактирующие через твердую среду	Штампы холодной листовой вытяжки и гибки, пресование труб, ротационная вытяжка листового металла, тонколистовая прокатка
12	Сопряжения деталей с гарантированным натягом (повреждения вследствие фреттинг-коррозии); неподвижные разъемные соединения; малоподвижные соединения деталей	Посадки подшипников на вал или в корпус; соединение бронзового венца червячного колеса со стальной ступицей; поршневые пальца; сопряжения поверхностей валов со ступицами лопаток турбин, бандажей железнодорожных колес, импеллера с валом в химическом реакторе; клиновые, заклепочные, штифтовые и другие соединения; шлицевые, шпоночные сопряжения; плавающие опоры
13	Детали, работающие в условиях ударного изнашивания	Рабочие органы щековых, валковых и конусных дробилок, шаровые мельницы, породоразрушающий инструмент, штамповый инструмент при холодной деформации
14	Электрические контакты (разрывные, скользящие и неподвижные); одновременное действие механических, тепловых и электрических факторов приводит к существенному изменению свойств контактирующих материалов и их фрикционно-износостойких характеристик	Скользящие токосъемные устройства, контакты электрических машин (электрощетки, кольца, и пр.), разъемные контакты, электроды машин контактной сварки, формообразующие инструменты-электроды
15	Поверхности контакта деталей, одна из которых эластичный материал	Ременные и фрикционные передачи, запорные устройства, полимерные и металлополимерные опоры скольжения
16	Запорные и регулирующие устройства, работающие в режиме замыкания и размыкания, предназначенные для перекрытия потоков среды	Краны (шаровые и конусные), у которых запирающий или регулирующий элемент, имеющий форму тела вращения или его части, поворачивается вокруг собственной оси, произвольно расположенной относительно направления потока рабочей среды; клапаны (вентили), у которых запирающие элементы (тарельчатые (золотниковые) или конические) перемещаются параллельно оси потока рабочей среды; задвижки, где запирающий или регулирующий элемент перемещается перпендикулярно оси потока рабочей среды; клиновые задвижки с двухдисковым или упругим клином; дисковые затворы, у которых запирающий или регулирующий элемент имеет форму диска, поворачивающегося вокруг оси, перпендикулярной или расположенной под углом к направлению потока рабочей среды

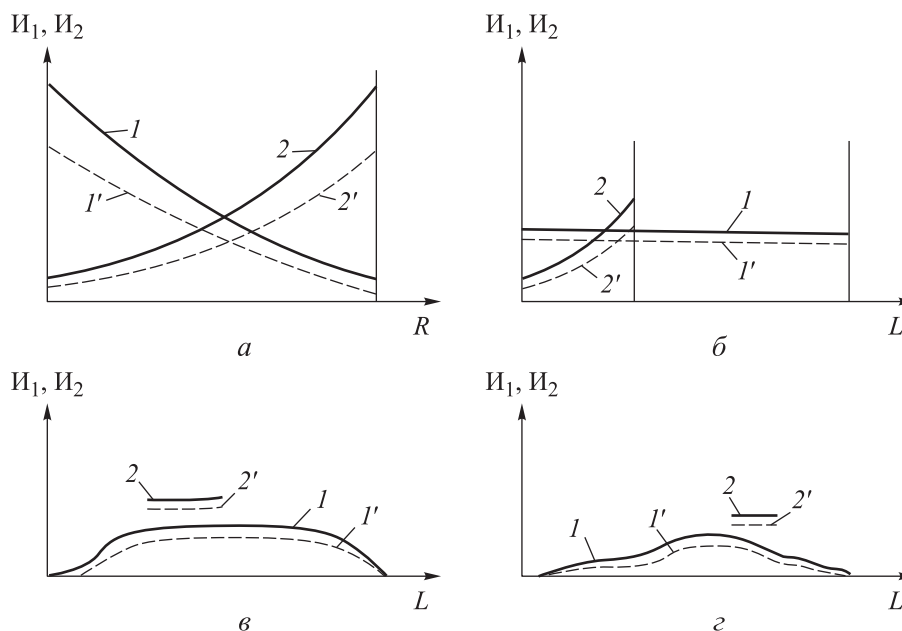


Рис. 2. Распределения износов по поверхности контакта первой I_1 (I, I') и второй I_2 ($2, 2'$) сопрягаемых деталей, относящихся к первой (а), третьей (б), четвертой (в) и пятой (г) группам: — и - - - - до и после подбора рационального сочетания материалов и технологий упрочнения

Распределения износов первой I_1 и второй I_2 сопрягаемых деталей первой группы по радиусу круговой площади контакта R показаны на рис. 2, а. Конструкция таких узлов обеспечивает сближение сопрягаемых деталей при износе по оси вращения. Суммарный износ $I = I_1 + I_2$ одинаков при любых значениях радиуса R . Однако из-за различия износостойкости материалов первой и второй деталей, условий теплоотвода и прочих факторов значения их износов неравны (кривые 1 и 2). Если детали соприкасаются по линейной поверхности, то имеет смысл учитывать не радиус круговой площади контакта R , а длину соприкосновения L пар трения.

Подбор более рационального варианта сочетания материалов деталей и технологий их упрочнения позволяет уменьшить износ каждой из них (кривые I' и $2'$), а следовательно, и суммарный износ. Крайне неравномерное распределение износа по круговым траекториям контакта может наблюдаться у деталей второй группы, а при наличии больших зазоров в дополнительных направляющих сопряжениях и у первой группы.

Третья группа сопряжений деталей включает в себя колодочные тормоза с жестким закреплением колодки, ходовой винт — гайку, шестеренные насосы (контакт их корпуса и головок зубьев) и др.

Распределения износов сопрягаемых деталей третьей группы по поверхности контакта показаны на рис. 2, б. Видно, что у первой детали износ равномерный, у второй — неравномерный. Более оптимальный подбор материалов и технологий упрочнения позволяет снизить износ деталей (кривые I' и $2'$).

Четвертая группа сопряжений деталей содержит вал — подшипник скольжения, осевые опоры скольжения с самоустанавливающимися несущими поверхностями (колодками), колодочные тормоза с самоустановкой колодок, круговые направляющие скольжения при эксцентричной нагрузке, центробежные колодочные муфты, тормозные диски, дисковые тормоза и др.

У сопряжений четвертой группы, как и у третьей, условия изнашивания сохраняются только для одной из деталей (рис. 2, в).

Пятая группа сопряжений деталей включает в свой состав золотниковые пары в гидрораспределителях, линейные подшипники скольжения и др. Переменные условия изнашивания для всех точек контакта обеих деталей характерны для сопряжений с низшими кинематическими парами. Интенсивность изнашивания на поверхностях трения распределена неравномерно.

Распределения износов поверхностей контакта первой и второй сопрягаемых деталей

пятой группы по направлению относительного движения показаны на рис. 2, з. У первой детали с более протяженной поверхностью контакта наблюдается более неравномерный износ, чем у второй детали.

Шестая группа сопряжений деталей, относящихся к низшим кинематическим парам, включает в себя пластинчатый насос, поступательные направляющие скольжения, кулису — камень, пластины — корпус и пластины — ротор в пластинчатых насосах и гидромоторах, пазы полумуфт и выступы промежуточного диска крестовых муфт, пружинно-кулачковые предохранительные муфты и др.

В шестой группе неравномерность износа деталей резко увеличивается, что можно изменить подбором более рационального сочетания материалов и технологий упрочнения.

Седьмая и восьмая группы сопряжений деталей являются высшими кинематическими парами, в которых идеальный контакт поверхностей трения имеет место при касании по линии или в точке. Здесь также высока вероятность неравномерного износа поверхностей.

Примерами сопряжений седьмой группы являются зубчатое зацепление, кулачок — толкатель, шестеренные насосы (зубья шестерен) и др. К сопряжениям восьмой группы относятся колесо — рельс, подшипники и направляющие качения, обгонная фрикционная роликовая муфта, фрикционные катки, шариковый винт и др.

Девятая и десятая группы сопряжений деталей относятся к контактному уплотнению вращающихся деталей и штоков, плунжеров и других деталей с поступательным или поступательно-вращательным движением. Их действие основано на их непосредственном контакте с уплотняемыми поверхностями.

Для сопряжений девятой группы характерны одинаковые условия изнашивания для точек поверхностей, расположенных на одной траектории. Интенсивность и продолжительность изнашивания и износ на окружностях каждой из поверхностей будут одинаковыми.

К ним относятся сальниковые уплотнения с мягкой набивкой, манжетные уплотнения, резиновые кольца типа «О», фетровые кольца, эластичные втулки, кольца — пробки, жесткие кольца [6]. В большинстве этих уплотнений

плотность прилегания к поверхности обеспечивается упругостью материала уплотнения, а жесткие кольца обычно требуют дополнительного прижима.

Резиновые кольца можно использовать при медленном вращении. Наибольшее распространение для уплотнения вращающихся валов получила манжета. Она состоит из стального каркасного кольца, придающего ей необходимую радиальную жесткость и позволяющего плотно устанавливать манжету в корпус, и из уплотняющего воротника, прижимаемого к валу кольцевой пружиной.

Достоинством уплотнений с жесткими кольцами является большая долговечность благодаря компенсации износа разжиманием или перемещением сегментов кольца, которое обычно состоит из сегментов, сжимаемых кольцевой пружиной. Детали жестких уплотнений можно выполнить из материалов, применяемых для изготовления подшипников скольжения.

Для корректной работы контактного уплотнения необходима соответствующая подготовка вала. Высокая гладкость поверхности ($Ra = 0,04...0,16$ мкм) не благоприятствует удержанию смазывающего вещества в неровностях, затрудняя создание микроэластогидродинамической пленки, а большая шероховатость поверхности ($Ra > 1,25$ мкм) вызывает увеличение износа и коэффициента трения. В связи с этим оптимальная шероховатость $Ra = 0,16...0,63$ мкм.

Другим важным для долговечности и эффективности уплотнения фактором является радиальное биение поверхности. Для податливых манжетных уплотнений оно не должно превышать 25 мкм. Несоосность установки манжеты относительно вала не должна превышать 0,25 мкм.

Сальниковые уплотнения с мягкой набивкой широко применяют в качестве уплотнительных узлов [11]. Твердость материала уплотняющего элемента (набивки) значительно меньше, чем у контртела. В качестве набивки используют дискретные материалы (порошки, гранулы) или волокна. Протечки одинаковы как при вращении деталей, так и при их неподвижном состоянии.

Ресурс работы сальникового уплотнения зависит от многих факторов: чистоты обработки поверхности подвижной уплотняемой детали и точности выполнения ее цилиндрической формы (отсутствия овальности для вала и конусности для штока), материала набивки, коэффици-

ента бокового давления, скорости движения уплотняемой детали, высоты набивки и др.

Наличие на поверхности подвижной уплотняемой детали рисок, царапин и других изъянов является причиной повышенного износа. Шероховатость Ra обработанной поверхности уплотняемых деталей должна быть не более 0,2... 0,4 мкм. Изнашивание набивки может быть усталостным и абразивным. Усталостный износ обусловлен дискретностью контакта волокон сальниковой набивки с уплотняемой деталью.

При внешнем трении происходит многократное деформирование волокон набивки, которое приводит к разрушению и отделению отдельных волокон материала. Степень и частота деформирования зависят от микрогеометрии трущейся поверхности, скорости движения, удельной нагрузки и температуры.

Десятая группа сопряжений характеризуется возвратно-поступательным движением деталей в условиях контакта со всесторонним сжатием, касания или самоустановки. Условия изнашивания сохраняются только для одной детали. К этой группе относятся сальниковые уплотнения с мягкой набивкой для штоков, манжетные уплотнения, эластичные втулки, кольца — пробки, поршневые кольца — гильза цилиндра, плунжеры с уплотнениями, золотниковые клапаны скважинных штанговых насосных установок и др.

В кривошипно-шатунном механизме шток при вращении кривошипа движется с переменной скоростью: от нуля в крайних (мертвых) положениях до максимального значения v_{\max} при положении кривошипа под углом, близким к 90° .

При расчете мощности, теряемой на трение в сальниковой набивке, за среднюю скорость движения штока принимают $v_{\text{ср}} = 0,5v_{\max}$. Мощность, теряемая на трение штока о сальниковую набивку, определяется выражением

$$N = q_z K_r L_n \pi d_0 f v_{\text{ср}},$$

где q_z — удельная нагрузка по текущему значению по оси z ; K_r — коэффициент бокового давления набивки; L_n — общая (суммарная) длина (высота) набивки; d_0 — начальный внутренний диаметр; f — коэффициент трения.

Шток движется возвратно-поступательно, поэтому контактирующий с ним слой набивки работает на усталость. Протечка уплотняемой среды — переменная величина, зависящая от направления движения штока: при перемеще-

нии в сторону нажимной втулки (при ее внешнем размещении) она будет больше, чем при движении в обратном направлении.

Шпиндели арматуры имеют и прямолинейное возвратно-поступательное, и вращательное, переменное по направлению движения. Если перемещение шпинделя обеспечивается вращением аксиально неподвижной гайки, то шпиндель перемещается прямолинейно вверх или вниз в зависимости от направления ее вращения. Если вращается шпиндель в неподвижной гайке, то его уплотняемая поверхность имеет сложное движение — вертикальное прямолинейное и вращательное.

Одиннадцатая группа сопряжений деталей

состоит из подвижных соединений, контактирующих через твердую среду. К этой группе относятся инструменты, взаимодействующие с обрабатываемыми материалами при прокатке, штамповке, притирке (абразивно-притирочная среда — деталь), конусные, щековые и валковые дробилки и пр. Поверхности трения изнашиваются неравномерно даже у элементов трибологической системы, работающих в паре.

Двенадцатая группа сопряжений деталей

включает в себя их соединения с гарантированным натягом, неподвижные разъемные и малоподвижные соединения деталей, поверхности которых подвергаются фреттинг-коррозии. Такое изнашивание происходит при малых взаимно колебательных движениях в пределах упругих деформаций микронеровностей поверхностей контакта.

К двенадцатой группе относятся посадки подшипников на вал или в корпус, соединение бронзового венца червячного колеса со стальной ступицей, поршневые пальцы, сопряжения поверхностей валов со ступицами лопаток турбин, компрессоров бандажей железнодорожных колес, импеллера с валом в химическом реакторе, клиновые, заклепочные, штифтовые соединения и др.

Тринадцатая группа сопряжений деталей

включает в свой состав соединения, работающие в условиях ударного изнашивания при повторяющемся соударении. Изучение изнашивания при ударе как самостоятельного вида начато сравнительно недавно [12]. Проблема повышения износостойкости оборудования и рабочих органов, функционирующих в услови-

ях удара, затрагивает следующие отрасли промышленности:

- *нефтяную и горную* — роторное, турбинное, ударное, ударно-вращательное и ударно-канатное бурение шпуров скважин, забивание и извлечение обсадных труб и анкерной крепи, ударный и виброударный способы измельчения пород и полезных ископаемых, очистка транспортных средств и обогащение руд, вибропогрузка и пр.;

- *машиностроение* — клепка, штамповка, запрессовка и выпрессовка, обрубка, насечка и пр.; виброударная очистка деталей и вибро-транспортирование, испытания на удар и вибрацию;

- *строительство* — разрушение бетона и кирпичной кладки, насечка бетона, виброударное уплотнение бетона и сыпучих материалов, вскрытие асфальтобетонных покрытий, рыхление мерзлого грунта, пробивка борозд, ниш и отверстий, возделывание почв, обработка камня при дорожно-строительных и других работах.

Четырнадцатая группа сопряжений деталей включает в себя электрические контакты, которые могут быть разрывными, скользящими и неподвижными. Одновременное действие механических, тепловых и электрических факторов приводит к существенному изменению свойств контактирующих материалов и их фрикционно-износостойких характеристик.

Электрокоррозионное изнашивание происходит при прохождении через контакт поверхностей трения электрического тока. Особую сложность представляет работа скользящих контактов. Одновременное действие механических, тепловых и электрических факторов приводит к существенному изменению свойств контактирующих материалов и их фрикционно-износостойких характеристик.

Пятнадцатая группа сопряжений деталей содержит подвижные и неподвижные соединения, контактирующие через эластичную среду. В случае если одним из контактирующих тел является эластомер, обладающий способностью к эластической деформации, добавляется до-

полнительный (гистерезисный) компонент, вносящий вклад в процессы взаимодействия поверхностей трущихся тел.

Для пар трения, в которых одним из контактирующих тел является эластомер, характерно эластогидродинамическое или вязкоупругое трение. В качестве примера можно привести герметизирующие устройства, а также различные запорные устройства. Так, для манжетных уплотнений валов важной задачей является обеспечение высокой степени герметичности и надежности при давлении жидкости выше 5...10 МПа и скорости скольжения более 10 м/с, а для торцевых уплотнений — при удельном давлении более 20 МПа и скорости скольжения более 40 м/с.

Шестнадцатая группа сопряжений деталей включает в себя запорные и регулирующие устройства, работающие в режиме замыкания и размыкания, предназначенные для перекрытия потока среды.

Выводы

1. Проблемы контактной механики для обеспечения высокой износостойкости узлов и пар трения исключительно многообразны. Опыт создания и совершенствования узлов и пар трения обуславливает поиск принципов обобщения громадного опыта науки и производства, теории и практики создания, использования пар трения.

2. Предложена система классификации сопряжений трущихся деталей по условиям изнашивания, дающая возможность системного подхода к обобщению опыта создания эффективных узлов трения, стимулирующая проведение исследований и разработок более рациональных конструкций узлов трения, расширение трансфера инновационных конструкций и технологий. Разработанная классификация обеспечивает обмен опытом создания и применения перспективных конструкций деталей и узлов трения и способов их упрочнения и восстановления с учетом подобных условий изнашивания между различными отраслями машиностроения.

Литература

- [1] Кузьменко А.Г. Развитие методов контактной трибомеханики. *Проблемы трибологии*, 2011, № 2, с. 117–134.

- [2] Кузьменко А.Г. Методы испытаний на износ при переменной площадке контакта с определением параметров k_w , t модели изнашивания (МПП) k_w , t . *Проблемы трибологии*, 2014, № 1, с. 123–138.
- [3] Кузьменко А.Г. *Развитие методов контактной трибомеханики*. Хмельницкий, ХНУ, 2010. 270 с.
- [4] Пантелеенко Ф.И., Лялякин В.П., Петров В.П. и др. *Восстановление деталей машин*. Москва, Машиностроение, 2003. 673 с.
- [5] Золотарев А.В. Научно-методическая база технологического обеспечения эксплуатационных свойств роликов установок непрерывной разливки стали при их ремонте. *Справочник. Инженерный журнал с приложением*, 2014, № 12, с. 39–45, doi: <https://doi.org/10.14489/hb.2014.12.pp.039-045>
- [6] Чичинадзе А.В., ред. *Основы трибологии*. Москва, Наука и техника, 1995. 778 с.
- [7] Браун Э.Д., Евдокимов Ю.А., Чичинадзе А.В. *Моделирование трения и изнашивания в машинах*. Москва, Машиностроение, 1982. 191 с.
- [8] Суслов А.Г., ред. *Инженерия поверхности деталей*. Москва, Машиностроение, 2008. 320 с.
- [9] Хейфец М.Л., Васильев А.С., Кондаков А.И. и др. Технологическое управление наследованием эксплуатационных параметров качества деталей машин. *Известия НАН Беларуси. Серия физико-технических наук*, 2015, № 3, с. 10–22.
- [10] Лещинский Л.К., Самотугин С.С. *Слоистые наплавленные и упрочненные композиции*. Мариуполь, Новый мир, 2005. 392 с.
- [11] Продан В.Д., Божко Г.В. *Сальниковые уплотнения с мягкой набивкой*. Тамбов, Изд-во ТГТУ, 2016. 124 с.
- [12] Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Албагачиев А.Ю. *Изнашивание при ударе*. Москва, Машиностроение, 1982. 192 с.

References

- [1] Kuz'menko A.G. Development of methods of contact tribomechanics. *Problemi tribologii* [Problems of Tribology], 2011, no. 2, pp. 117–134. (In Russ.).
- [2] Kuz'menko A.G. Methods of test for wear at the contact area with the variable definition parameters k_w , t , models wear (WFP), k_w , t . *Problemi tribologii* [Problems of Tribology], 2014, no. 1, pp. 123–138. (In Russ.).
- [3] Kuz'menko A.G. *Razvitie metodov kontaktnoy tribomekhaniki* [Development of contact tribomechanics methods]. Khmel'nits'kiy, KhNU Publ., 2010. 270 p. (In Russ.).
- [4] Panteleenko F.I., Lyalyakin V.P., Petrov V.P. et al. *Vosstanovlenie detaley mashin* [Machine parts recovery]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 673 p. (In Russ.).
- [5] Zolotarev A.V. Scientific and methodological base for technology provision of continuous casting rollers operational properties at repair. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem* [Handbook. An Engineering Journal with Appendix], 2014, no. 12, pp. 39–45, doi: <https://doi.org/10.14489/hb.2014.12.pp.039-045> (in Russ.).
- [6] Chichinadze A.V., ed. *Osnovy tribologii* [Basics of tribology]. Moscow, Nauka i tekhnika Publ., 1995. 778 p. (In Russ.).
- [7] Braun E.D., Evdokimov Yu.A., Chichinadze A.V. *Modelirovanie treniya i iznashivaniya v mashinakh* [Modelling of friction and wear-out in machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 191 p. (In Russ.).
- [8] Suslov A.G., ed. *Inzheneriya poverkhnosti detaley* [Design of a part surface]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 320 p. (In Russ.).
- [9] Kheyfets M.L., Vasil'yev A.S., Kondakov A.I. et al. Technological management of inheritance of quality parameters of a work piece. *Izvestiya NAN Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-Technical Series], 2015, no. 3, pp. 10–22. (In Russ.).
- [10] Leshchinskiy L.K., Samotugin S.S. *Sloistye naplavlennye i uprochnennye kompozitsii* [Layered deposited and hardened compositions]. Mariupol', Novyy mir Publ., 2005. 392 p. (In Russ.).

- [11] Prodan V.D., Bozhko G.V. *Sal'nikovye uplotneniya s myagkoy nabivkoy* [Gland seals with soft packing]. Tambov, Izd-vo TGTU Publ., 2016. 124 p. (In Russ.).
- [12] Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Albagachiev A.Yu. *Iznashivanie pri udare* [Impact wear]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 192 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 17.05.2022

Информация об авторах

ХАРЛАМОВ Юрий Александрович — доктор технических наук, профессор кафедры «Машины металлургического оборудования». ГОУ ВО «Донбасский государственный технический университет» (94204, Алчевск, Российская Федерация, Проспект Ленина, д. 16, e-mail: mmkipm@mail.ru).

ЖИЛЬЦОВ Александр Павлович — кандидат технических наук, профессор кафедры «Металлургическое оборудование». ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» (398055, Липецк, Российская Федерация, ул. Московская, д. 30, e-mail: zhiltsov_ap@mail.ru).

ВИШНЕВСКИЙ Дмитрий Александрович — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Машины металлургического комплекса». ГОУ ВО «Донбасский государственный технический университет» (94204, Алчевск, Российская Федерация, Проспект Ленина, д. 16, e-mail: dimavish.79@mail.ru).

ПЕТРОВ Павел Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины металлургического комплекса». ГОУ ВО «Донбасский государственный технический университет» (94204, Алчевск, Российская Федерация, Проспект Ленина, д. 16, e-mail: pavelpetrov@list.ru).

БОЧАРОВ Александр Викторович — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Металлургическое оборудование». ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» (398055, Липецк, Российская Федерация, ул. Московская, д. 30, e-mail: alor_fr@mail.ru).

Information about the authors

KHARLAMOV Yuriy Aleksandrovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Machines of the Metallurgical Complex. Donbass State Technical University (94204, Alchevsk, Russian Federation, Lenin Avenue, 16, e-mail: mmkipm@mail.ru).

ZHILTSOV Alexander Pavlovich — Candidate of Science (Eng.), Professor of the Department of Metallurgical Equipment. Lipetsk State Technical University (398055, Lipetsk, Russian Federation, Moskovskaya St., 30, e-mail: zhiltsov_ap@mail.ru).

VISHNEVSKY Dmitry Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Machines of the Metallurgical Complex. Donbass State Technical University (94204, Alchevsk, Russian Federation, Lenin Avenue, 16, e-mail: dimavish.79@mail.ru).

PETROV Pavel Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Department of Machines of the Metallurgical Complex. Donbass State Technical University (94204, Alchevsk, Russian Federation, Lenin Avenue, 16, e-mail: pavelpetrov@list.ru).

BOCHAROV Alexandr Viktorovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Metallurgical Equipment. Lipetsk State Technical University (398055, Lipetsk, Russian Federation, Moskovskaya St., 30, e-mail: alor_fr@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Харламов Ю.А., Жильцов А.П., Вишневецкий Д.А., Петров П.А., Бочаров А.В. Систематизация сопряжений деталей узлов трения машин по условиям их контакта. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 11, с. 12–24, doi: 10.18698/0536-1044-2022-11-12-24

Please cite this article in English as:

Kharlamov Y.A., Zhiltsov A.P., Vishnevskiy D.A., Petrov P.A., Bocharov A.V. Systematization of Interfaces of Parts of Friction Units of Machines According to the Conditions of Their Contact. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 11, pp. 12–24, doi: 10.18698/0536-1044-2022-11-12-24