

большую энергию, от двух до пятидесяти киловатт, поэтому, если не принять специальных мер, могут стать причиной разрушения дисков, лопаток турбин, трубопроводов и других элементов конструкций.

В системе ASGEARS имеются средства, для расчета энергии колебаний, средства для их уменьшения и использования результатов расчета для целей диагностики зубчатых передач.

Характеристики нелинейных колебаний во временной области и спектр в частотной области являются признаками для диагностики зубчатых передач.

Выводы:

1. С помощью программного комплекса ASGEARS рассчитываются силы, действующие на опоры и прогибы валов.
2. Для устранения концентрации напряжений на зубьях колес применяется модификация боковой поверхности зубьев.
3. Дополнительные опоры валов существенно уменьшают прогиб валов, но могут стать причиной многократного увеличения нагрузок на опоры валов.
4. Прогиб валов – это фактор, существенно влияющий на концентрацию напряжений в зубчатых передачах.
5. Сигналы вибраций зубчатых передач в первом приближении адекватны физическим процессам пересоприжения зубьев колес редуктора, поэтому могут быть использованы для диагностики зубчатых передач.
6. Программный комплекс ASGEARS успешно применялся при проектировании зубчатых передач в ГП "Ивченко-Прогресс", изготавливаемых предприятием "Мотор Сич", г. Запорожье и АО "Салют", г. Москва.

Список литературы: 1. Кравченко И.Ф., Единолич А.Б., Яковлев В.А., Дорофеев В.Л. Экспериментальные и теоретические результаты исследования авиационных зубчатых передач для двигателей пятого и шестого поколений // Авиационно-космическая техника и технологии. – 2008. – №8(55). – С.129-134. 2. Дорофеев В. Л., Дорофеев Д.В., Единолич А.Б., Корнейчук А. В. Особенности проектирования редукторов для самых мощных в мире украинско-российских авиационных двигателей // Вісник Національного Технічного університету "ХП". Збірник наукових праць. Тематичний випуск "Проблеми механічного приводу". – Харків: НТУ "ХП", 2010. – №27. – С.54-61. 3. Дорофеев В.Л., Голованов В.В., Дорофеев Д.В. Система моделирования "AEROFLANK" & прямой синтез износостойких и малошумных зубчатых передач // Вісник НТУ "ХП". – 2013. – №40(1013). – С.40-49. 4. Голованов В.В., Дорофеев В.Л., Дорофеев Д.В., Новиков В.С., Павленко Ю.М. Исследование зависимости контактных напряжений в конических зубчатых передачах с круговыми зубьями от степени локализации контакта // Вісник НТУ "ХП". – 2014. – №31(1074). – С.20-23. 5. Дорофеев В.Л. Основы применения метода конечных элементов в системах автоматического проектирования. – Бишкек: Изд-во БПИ, 1991. – 21с. 6. Норри Д., де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. – М.: Мир, 1981. – 304с.

Bibliography (transliterated): 1. Kravchenko I.F., Edinovich A.B., Yakovlev V.A., Dorofeev V.L. Eksperimental'nye i teoreticheskie rezultaty issledovaniya aviacionnyh zubchatyh peredach dlya dvigatelej pyatogo i shestogo pokolenij // Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologii, 2008, No8 (55) – P.129-134. 2. Dorofeev V.L., Dorofeev D.V., Edinovich A.B., Kornejchuk A.V. Osobennosti proektirovaniya reduktorov dlya samyh moshhnyh v mire ukrainko-rossijskih aviacionnyh dvigatelej. // Visnik NTU "KhPI". Zb. nauk. prac', Ser. "Problemi mehanichnogo privodu". Kharkiv: NTU "KhPI", 2010. – №27. – P.54-61. 3. Dorofeev V.L., Golovanov V.V., Dorofeev D.V. Sistema modelirovaniya "AEROFLANK" & pryamoj sintez iznosostojkih i maloshumnyh zubchatyh peredach // Visnik NTU "KhPI". – 2013. – No40 (1013). – P.40-49. 4. Golovanov V.V., Dorofeev V.L., Dorofeev D.V., Novikov V.S., Pavlenko Yu.M. Issledovanie zavisimosti kontaktnyh napryazhenij v konicheskix zubchatyh peredachah s krugovymi zub'jami ot stepeni lokalizacii kontakta // Visnik NTU "KhPI". – 2014. – No31(1074). – P.20-23. 5. Dorofeev V.L. Osnovy primeneniya metoda konechnyh elementov v sistemah avtomaticheskogo proektirovaniya. Izd-vo BPI, Bishkek, 1991. – 21p. 6. Norri D., de Friz Zh. Vvedenie v metod konechnyh elementov. – Moscow.: Mir, 1981. – 304p.

Поступила (received) 22.04.2015

А.В. ЗАХАРЧЕНКО, старший преподаватель каф. автомобильного транспорта Университета "Украина", Киев

ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЁВ, ОБРАЗУЕМЫХ ПРИСАДКАМИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТРЕНИЯ, НА ХАРАКТЕР ДЕФОРМАЦИИ МАТЕРИАЛОВ СОПРЯЖЕНИЙ

На основании современных трибологических источников предлагается аналитический обзор путей решения проблемы выбора по состоянию и характеру деформации поверхностных слоёв трибосопряжений определённого смазочного материала, который соответствует конкретным условиям эксплуатации. Систематизированы требования для нахождения пороговых значений результата совместного действия тепловых и механических нагрузок, когда поверхностные слои трущихся тел становятся химически и каталитически активными, что есть необходимым для интенсификации процессов образования эффективного химически модифицированного слоя.

Ключевые слова: пакет присадок, химически активные вещества, поверхность трения, поверхностный слой, хемосорбция, химически модифицированный слой, вторичная структура.

Актуальность задачи. Субшероховатость, характеризующая тонкую структуру реальной поверхности нанометрического масштаба, выявлена на поверхности микронеровностей. Механические свойства и структура поверхностных слоёв (ПС) трибосопряжений, образуемых присадками на поверхностях трения (ПвТ), рассмотрены в [1]. По мнению Б.И. Костецкого характеристики субмикроскопического рельефа являются теми факторами, без которых невозможно достаточно объективное понимание процессов трения, износа и смазки [2].

Постановка проблемы. По мнению авторов [3] при трении скольжения основную роль в диссипации внешней (подведённой) энергии в изнашиваемых объектах материалов играют эффекты на мезо- и фрагментарном структурных уровнях, т.е. в пределах от $l_m=0,1...3,0\text{мкм}$ (мезомасштаб) до $l_{\Phi}=(3...10)l_m$ (масштаб фрагментарных структур). Под макромасштабным уровнем нагружения подразумевают соответствующую глубину структурных изменений в пределах от $10\text{--}10^4\text{мкм}$. При изнашивании значительная часть потока внешней энергии подвергается диссипации за счёт многомасштабности структур в слое материала толщиной до $20...30\text{мкм}$. При этом структура и морфология ПвТ является результатом самоорганизации материала в соответствии с принципом минимума производства энтропии [3].

Качество поверхности деталей машин определяется её геометрией, строением, физическими, химическими и механическими свойствами ПС и напряжениями в них. В процессе нагружения трением (приработка и затем эксплуатация) происходит коренное изменение состояния поверхности.

Переход от исходного состояния поверхности к эксплуатационному осуществляется под воздействием факторов внешнего трения: нагрузки, скорости движения, температуры в зоне контакта и среды. Изменения качества поверхности и, особенно, состояния тонких ПС во время работы пар трения могут быть обратимыми, исчезающими после снятия нагрузки, и необратимыми, остаточными. Поэтому эксплуатационное качество поверхности определяется не только остаточными характеристиками после снятия нагрузки, но и текущими изменениями в процессе трения [4].

Анализ последних исследований и публикаций следует начать с того, что несмотря на большую актуальность химии присадок и значительный объём проделанных исследований, монографическая литература по вопросу влияния структурного состояния ПС на характер деформации материалов сопряжений в зависимости от состава смазочных сред крайне бедна. При трении скольжения или качения топография контактирующих поверхностей непрерывно изменяется [5]. В связи с этим важным представляется задача классификации структур поверхностей, формирующихся в процессе трения. Эта задача не нова, такие классификации разработаны, однако большинство из них характеризуют крупномасштабные изменения в ПС, приводящие, как правило, к выходу узла трения из строя (см., например, стандарт ISO/DIS 7146). В то же время отсутствует классификация структур, соответствующим обычным режимам трения. В [6] описываются характерные морфологические признаки поверхностей, сформировавшихся при различных режимах трения, предложена их классификация и возможные механизмы формирования соответствующих структур.

Различия в строении ПС металла предопределяют механизмы изнашивания. Это позволяет выявить как преобладающие крупномасштабные механизмы, определяющие процесс трения, так и специфику их реализации [7]. В частности, образование ступенчато изменяющейся по глубине фрагментированной структуры, возникающей вследствие пластического течения, приводит к отслоению верхней её части в результате процесса, названного "износом течением". Представляется, что этот износ носит усталостный характер в силу многократного воздействия на ПвТ, необходимого для формирования слоя дисперсных фрагментов и образования частиц продуктов изнашивания [8].

Можно добавить, что влияние динамических нагрузжений при трении сказывается не только на формировании приповерхностной зоны пластического течения, но и на образовании частиц износа. При динамическом воздействии в вязком материале на некоторой глубине от поверхности возникают микропоры за счёт растягивающих напряжений, обусловленных циклическим деформированием в процессе трения [9]. Микропоры сливаются, образуя зародышевые трещины, которые затем раскрываются, формируются частицы износа [10]. Размер элементарных фрагментов разрушения (~10нм) считается адекватным размеру микроконтактов, на которых реализуется адгезионное взаимодействие [11]. Усталостная теория получает физическое обоснование фрагмента разрушения в результате накопления структурных повреждений дислокационного характера и образования микротрещин по границам сетки фрагментированного ПС [11]. Механизм отделения элементарных фрагментов является адгезионным и реализуется в первую очередь за счёт среза материала с меньшей когезионной энергией [10].

Существенно более сложным и менее очевидным представляется механизм изнашивания участков с равномерно изменяющейся по глубине фрагментированной структурой. В этих случаях наиболее вероятным механизмом изнашивания таких участков является образование частиц износа путём зарождения и развития микротрещин по границам фрагментов в местах критических стыков между ними [12]. При этом как нижняя, так и боковые грани частиц износа представляют собой стенки фрагментов. Очевидно, что образующиеся таким путём частицы износа, как и его величина, меньше, чем при ступенчато изменяющемся строении ПС [13].

Изменение топографии ПвТ зависит также от вида изнашивания. Как уже

отмечалось, адгезионное изнашивание приводит к огрублению поверхности, а абразивное и коррозионное изнашивание могут вызывать её выглаживание. Особенно высокое качество поверхности достигается при коррозионном изнашивании и объясняется растворением вершин неровностей. К выглаживанию поверхности приводит, в частности, введение в смазочный материал (СМ) противоизносных присадок и присадок для работы при высоком давлении. Фрикционное взаимодействие оказывает чрезвычайно сильное воздействие на состояние ПС, и топография ПвТ определяется в первую очередь условиями работы, а не исходной шероховатостью. В узлах трения, работающих со СМ, нередко используют заведомо грубые поверхности [5].

На основании этого можно сделать следующее предположение: "равновесная" шероховатость ПвТ формируется на "равновесной" структуре ПС, т.е. микрорельеф стабилизируется только после стабилизации размера зерна. Действующие же температуры и давления в процессе большинства технологических операций, как правило, значительно отличаются от эксплуатационных, что исключает возможность управления периодом приработки только за счёт обеспечения определённых параметров микрорельефа. Физический смысл формирования структурного "портрета" ПС можно представить следующим образом: если при окончательном методе обработки силовые и температурные факторы "жестче", чем при эксплуатации, то зерно в процессе трения растёт, если "мягче", то уменьшается [14].

Фактическая площадь контакта составляет около 0,01-0,1% номинальной площади. Даже при высоких нагрузках, обеспечивающих преимущественно пластический контакт, она не превышает 40% [15]. Силовые воздействия на участках фактического контакта имеют форму многократных кратковременных импульсов. Расчёты показывают, что давления на площадках фактического контакта находятся в пределах 100-1000МПа, время контактирования элементарных участков составляет 0,000001-0,0001с [16].

Образование и разрушение вторичных структур (ВС) сопровождается деформированием и активацией ПС [2]. Формирование ВС в значительной степени зависит от состава СМ. Известно, что в результате физической адсорбции на ПвТ образуется квазикристаллический слой смазки [17]. Параметры этого слоя определяются, с одной стороны, свойствами и структурным состоянием молекул смазки и, с другой стороны, составом и структурным состоянием поверхности металлической фазы [18].

Многочисленные экспериментальные исследования [19] показывают, что большая часть энергии, затраченная на деформацию, превращается в тепло и лишь несколько процентов этой энергии запасается на образование дефектов кристаллической решётки [20]. Известно [21], что при деформации металлов практически вся запасённая энергия расходуется на образование или на увеличение энергии взаимодействия дефектов решётки. Концентрация дефектов (запасённая энергия) характеризует неравновесное состояние металла. При деформировании на 10% концентрация дефектов может достигать 10^{18} - 10^{19} см⁻³ [21].

ПС металла обладает избыточной поверхностной энергией, которая увеличивает его химическую активность. Это обусловлено тем, что внутри твёрдого тела каждый атом металла окружён и связан с соседними по всем направлениям. Атомы ПС имеют свободные связи, благодаря которым возможно их взаимодействие с находящимися в атмосфере веществами, в том числе и с окислителями. В результате на поверхности металла образуются оксиды [15].

При трении количество вакансий в таком ПС достигает $2,5 \times 10^{21}$ атомов/см³ [2]. Химические реакции на поверхности изменяют её состав, химическую активность, снижают поверхностную энергию [5].

Результаты экспериментальных и теоретических работ [22-26] показали, что свойства противоизносных слоёв металлов отличаются от свойств глубоких слоёв. В этих же работах показано значительное влияние состояния поверхности и внешней среды как на деформацию ПС, так и на общий характер деформации [27].

Исследования дислокационных механизмов пластической деформации при трении впервые выполнены Б.И. Костецким с сотрудниками. Изучены особенности структурных механизмов деформирования при трении скольжения и качения в поверхностных и химически активных средах [20]. Важным результатом изучения деформируемой структуры ПвТ является выявление процесса текстурирования и аморфизации при нормальных условиях трения [28]. Установлено, что ВС являются устойчивыми и обладают свойством саморегулирования [29-30]. Схема строения ПС при наличии ВС, возникающих при кинетическом фазовом переходе, представлена на рисунке 1 [31].

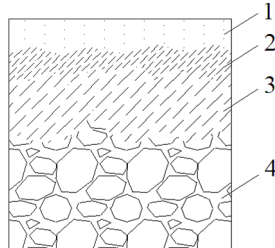


Рисунок 1 – Схема строения ВС:

- 1 – II тип; 2 – I тип; 3 – подповерхностный слой;
- 4 – исходная структура [31]

и параметров СО ТС с помощью конструкторских, технологических и эксплуатационных средств [31].

Известно, что фрагментирование ПС трения сопровождается текстурированием. Рассмотрим возможный механизм формирования текстуры ПвТ. Отмеченное свойство тонкого (субмикронного) ПС, заключающееся в отсутствии дислокационных линий, параллельных плоскости поверхности, означает, что ПС не имеет разориентировок с осью, лежащей в плоскости слоя. Уже это обстоятельство говорит о формировании определённой поверхностной текстуры. Что касается конкретной кристаллографической ориентации ПС, она определяется минимумом поверхностной энергии кристалла. Поверхностное натяжение анизотропного тела – кристалла, различно для различных его граней. Оно, таким образом, является функцией от направления грани (индексов Миллера) [33]. Наибольшая свободная энергия реализуется при малых индексах [34].

Анализ состояния ПС трущихся тел приводит к необходимости рассмотрения двух различных форм напряжённо-деформированного состояния [20]:

1. В тончайших ПС ($100 \div 1000 \text{ \AA}$) происходит интенсивная и направленная пластическая деформация – текстурирование (преимущественная ориентация металлических структур – от зёрен до дефектов структуры в направлении дви-

жения). В результате многократных воздействий в конечном счёте происходит аморфизация ПС металла.

2. В нижележащих слоях (порядка сотен микрон) имеет место волновой процесс распространения упругих деформаций, связанный с относительным перемещением трущихся тел [20].

Нормальный режим трения характеризуется высоким градиентом структурных изменений в ПС и их почти полным отсутствием в нижележащих слоях. Этот ПС при нормальном износе составляет $100 \div 200 \text{ мкм}$, а при граничном трении (чувствительность прибора 5 мкм) – не обнаруживается. Исследования методом прямого наблюдения дислокаций показывают, что этот слой при граничном трении составляет не более $1000 \div 1200 \text{ \AA}$ [35].

Твёрдые плёнки обычно состоят из оксидов металлов и имеют толщину $\sim 10^{-8} \text{ м}$ ($\sim 100 \text{ \AA}$). Примыкающие к ним один или несколько мономолекулярных слоёв граничной смазки имеют толщину $\sim 3/10^{-9} \text{ м}$. Иногда твёрдые плёнки оказываются не сплошными из-за физических и химических воздействий в процессе их образования [36]. Даже если эти плёнки первоначально непрерывны, они могут отрываться в процессе скольжения, обнажая тем самым чистые металлические поверхности и создавая весьма высокое сопротивление трения. Граничные плёнки могут быть чрезвычайно тонкими (мономолекулярный слой хемосорбированного мыла) и толстыми (плёнка сульфида железа толщиной $1 \times 10^{-7} \text{ м}$) [36]. Наличие поверхностных плёнок изменяет не только адгезионные характеристики, но и деформируемость материала. Снижение деформируемости может оказаться весьма значительным [5].

Как известно [37], подразделить плёнки на "тонкие" и "толстые" можно лишь условно и относительно. Одна и та же плёнка может быть "тонкой" по одному признаку и "толстой" – по другому. Однако такое деление приобретает чёткий физический смысл, когда рассматривается конкретная физическая характеристика или определённое структурное состояние. Критерием тонкоплёночного состояния может служить критическая толщина, ниже которой возникают аномалии рассматриваемых свойств (физических, химических, механических) по сравнению с "массивным" состоянием. Критические значения толщин ПС, ниже которых проявляются аномалии этих свойств, существенно зависят от природы сопряжённых материалов, условий трения и состава смазочных композиций. Специфика напряжённого состояния и структуры контактной зоны является главным фактором, обуславливающим механизмы структурной приспособляемости материалов при трении [18].

Структурные особенности ПвТ несут информацию в основном о тех процессах, которые происходят в тот момент времени, когда элементы пары трения были остановлены и разъединены. Поэтому для восстановления полной картины процесса фрикционного взаимодействия необходимо пользоваться дополнительной информацией, получаемой непосредственно в ходе испытания (о динамике изменения коэффициента трения, электропроводности контакта, толщины смазочного слоя и пр.) [38-41].

На рисунке 2 приведена схема, иллюстрирующая возможности использования явления структурной приспособляемости материалов, на которой условно выделены три уровня приспособляемости: случайная, эмпирически достигнутая и теоретическая. Для приближения к уровню теоретической поверхностной прочности необходима конкретизация физических моделей явления структурной приспособляемости с учётом реально существующего мно-

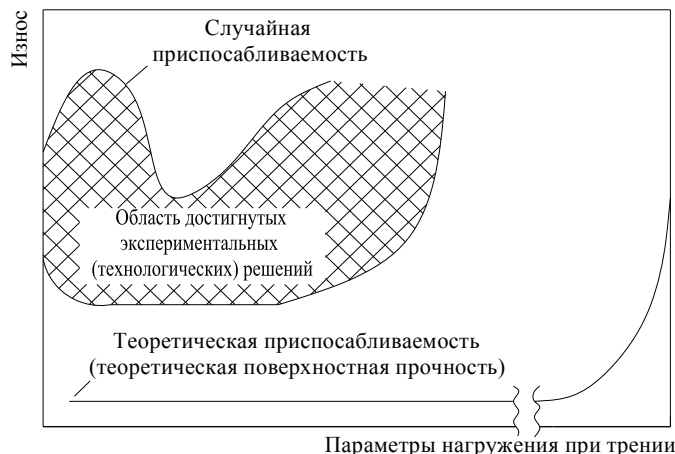


Рисунок 2 – Схема использования явления структурной приспособляемости материалов [18]

гообразия механо-физико-химических процессов в многофазной системе твёрдое тело-жидкость-газ. Сложность этой задачи состоит в том, что для ВС весьма ограничено применимы классические представления теории несовершенств кристаллического строения. Это вызывает необходимость глубокого изучения атомных и элект-

тронных взаимодействий с учётом кинетики процессов трения [18].

Изложенная концепция образования ПС как результата многократного ударного теплового и механического воздействий не противоречит экспериментальным фактам ни для установившегося нормального режима трения, ни в случае критического трения, обусловленного схватыванием. Однако следует подчеркнуть, что для описания процессов трения и изнашивания необходимо привлечение методов мезомеханики, поскольку локализация напряжений и деформаций, определяемая неоднородностью структуры поверхности, задаёт мезоскопический масштаб пластической деформации. К сказанному можно добавить, что в мезомеханике релаксация концентраторов напряжений вызывает появление поворотных моделей пластической деформации, которые аномально высоки по сравнению с трансляционными. Это и влечёт за собой высокую степень фрагментации слоя трения, для которого характерна локализация напряжений в пятнах контактов.

Выводы. Таким образом, можно считать, что в самом общем случае лучшими триботехническими характеристиками обладают те пары трения, на поверхности которых под действием химически активных веществ (присадок) сформировалась более однородная структура. Если на ПвТ имеет место комбинация элементов рельефа, характерных для различных структур, то это свидетельствует о нестабильной работе узла трения. Большое количество отдельных дефектов на поверхностях также свидетельствует, как правило, о нестабильности работы пары трения, что характеризуется низкими триботехническими характеристиками (высокими значениями и сильными колебаниями f , нестабильной толщиной смазочного слоя, значительным износом).

Список литературы: 1. *Захарченко А.В.* Механические свойства и структура тонких поверхностных слоёв трибосопряжений, образуемых присадками на поверхностях трения // *Вісник НТУ "ХПІ"*. Збірник наукових праць. Серія: Проблеми механічного приводу. – Харків: НТУ "ХПІ", 2014. – №31(1074). – С. 41-52. 2. *Киртиченко Ю.Е., Трофименко А.Ф.* Основы трибологии. – Гомель: Инфотрибо, 1995. – 224с. 3. *Погодаев Л.И., Чулкин С.Г., Дудко П.П., Кузьмин В.Н.* Структурно-энергетический подход к оценке влияния смазочных композиций на износостойкость трибосопряжений. Ч. 1. Структурно-энергетическая

модель изнашивания // *Трение и износ.* – 2001. – Т.22, №2. – С.168-172. 4. *Костецкий Б.И., Колесниченко Н.Ф.* Качество поверхности и трение в машинах. – К.: Техніка, 1969. – 215с. 5. *Бакли Д.* Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Пер. с англ. *А.В. Белого, Н.К. Мышкина*; Под ред. *А.И. Свириденко*. – М.: Машиностроение, 1986. – 360с. 6. *Кузьмин Н.Н., Шувалова Е.А., Транковская Г.Р., Муравьёва Т.И.* Методы анализа структур поверхностей, формирующихся в процессе трения // *Трение и износ.* – 1996. – Т.17, №4. – С.480-486. 7. *Алексеев Н.М., Кузьмин Н.Н., Транковская Г.Р., Шувалова Е.А.* О самоподобии процессов изнашивания на различных масштабных уровнях // *Трение и износ.* – 1992. – Т.13, №1. – С.161-171. 8. *Гарбар И.И.* О структуре и строении поверхностных слоёв сопряжённых материалов трущихся пар // *Трение и износ.* – 1990. – Т.11, №4. – С.581-593. 9. *Колесников Ю.В., Морозов Е.М.* Механика контактного разрушения. – М.: Наука, 1989. – 276с. 10. *Попов В.Л., Колубаев А.В.* Анализ механизмов формирования поверхностных слоёв при трении // *Трение и износ.* – 1997. – Т.18, №6. – С.818-826. 11. *Михин И.М.* Внешнее трение твёрдых тел. – М.: Наука, 1977. – 164с. 12. *Колесников Ю.В., Морозов Е.М.* Механика контактного разрушения. – М.: Издательство ЛКИ, 2007. – 224с. 13. *Партон В.З., Морозов Е.М.* Механика упругопластического разрушения: Основы механики разрушения. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 352с. 14. *Томаш А.В.* Технологическое обеспечение физических и эксплуатационных свойств поверхностных слоёв деталей машин // *Трение и износ.* – 1997. – Т.18, №3. – С. 385-394. 15. *Богданович П.Н., Прушак В.Я.* Трение и износ в машинах. – Мн.: Выш. шк., 1999. – 374с. 16. *Костецкая Н.Б.* Механизмы структурной приспособляемости и управление изнашиванием машин. – К.: Наукова думка, 1985. – 236с. 17. *Ахматов А.С.* Молекулярная физика граничного трения. – М.: Физматгиз, 1963. – 472с. 18. *Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, И.Г. Новосовский, А.К. Караулов и др.; Под общ. ред. д-ра техн. наук Б.И. Костецкого.* – К.: Техніка, 1976. – 296с. 19. *Мак-Лин Д.* Механические свойства металла. – М.: Металлургия, 1965. – 394с. 20. *Костецкий Б.И., Натансон М.Э., Бершадский Л.И.* Механохимические процессы при граничном трении. – М.: Наука, 1972. – 172с. 21. *Ван-Бюрен* Дефекты в кристаллах. – М.: Иностранная литература, 1962. – 328с. 22. *Алехин В.П., Шориоров М.Х.* Влияние особенностей микропластической деформации вблизи свободной поверхности твёрдого тела на общую кинетику макропластического течения // *Физика и химия обработки материалов.* – 1973. – № 5. С.84-101. 23. *Алехин В.П., Шориоров М.Х.* Структурные особенности кинетики микропластической деформации вблизи свободной поверхности твёрдого тела // *Физика и химия обработки материалов.* – 1974. – № 4. – С.107-121. 24. *Иванова В.М., Терентьев В.Ф., Пойда В.Г.* Особенности поведения поверхностного слоя металлов при различных условиях нагружения // *Металлофизика.* – Вып.43. – К.: Наукова думка, 1972. – С.63-82. 25. *Крампер И., Демер Л.* Влияние среды на механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1964. – 88с. 26. *Шориоров М.Х., Алехин В.П.* Влияние среды и состояния поверхности на процесс пластической деформации кристаллов // *Физика и химия обработки материалов.* – 1976. – №1. – С.61-76. 27. *Буше Н.А., Копытько В.В.* Совместимость трущихся поверхностей. – М.: Наука, 1981. – 128с. 28. *Рыжих Н.П.* Исследование и оценка противозносных свойств антифрикционных сплавов // *Труды КИГВФ "Трение, смазка и износ деталей машин"*. – Вып.3. – К.: Изд-во КИГВФ, 1962. – С.78-81. 29. *Костецкий Б.И., Бершадский Л.И., Чукреев Е.П.* Об явлении саморегулирования при износе металлов // *ДАН СССР.* – 1970. – Т.190, №5. – С.1112-1114. 30. *Костецкий Б.И., Бершадский Л.И.* Динамическое равновесие при трении и износе металлов // *ДАН СССР.* – 1970. – Т.191, №6. – С.1337-1339. 31. *Костецкий Б.И.* Эволюция структурного и фазового состояния и механизмы самоорганизации материалов при внешнем трении // *Трение и износ.* – 1993. – Т.14, №4. – С.773-783. 32. *Костецкий Б.И.* Фундаментальная закономерность самоорганизации технических трибосистем // *ДАН УССР.* Сер.А. – 1989. – №4. – С.52-57. 33. *Физика твёрдого тела: Энциклопед. слов. Т. 1 / Сост.: В.Г. Барьяхтар, В.Л. Винецкий, А.С. Бакай и др.* – К.: Наук. думка, 1996. – 652с. 34. *Ландау Л.Д.* О равновесной форме кристаллов // *Сб. трудов.* Т.2. – М.: Наука, 1969. – 408с. 35. *Костецкий Б.И., Бершадский Л.И., Аронов В.А.* // *ДАН СССР.* – 1970. – Т.190, №6. – С.1337. 36. *Мур Д.* Основы и применения трибоники / Пер. с англ. *М.А. Харламова*; Под ред. *И.В. Крагельского.* – М.: Мир, 1978. – 488с. 37. *Палатник Л.С., Фукс С.Я., Косевич В.М.* Механизм образования и субструктура конденсированных плёнок. – М.: Наука, 1972. – 320с. 38. *Алексеев Н.М., Кузьмин Н.Н., Транковская Г.Р., Шувалова Е.А., Чекина О.Г.* Методика исследования смазочного действия // *Практическая трибология.* – Москва, 1994. – С.325-328. 39. *Захарченко А.В.* Коэффициент трения в трибосполучениях як головний параметр процесу // *Вісник НТУ "ХПІ"*. Збірник наукових праць. Серія: Проблеми механічного приводу. – Харків: НТУ "ХПІ", 2009. – №19. – С.58-68. 40. *Захарченко А.В.* Температурний критерій в трибосопряженнях як характеристика параметрів процесу // *Вісник НТУ "ХПІ"*. Збірник наукових праць. Серія: Проблеми механічного приводу. – Харків: НТУ "ХПІ", 2011. – №28. – С.53-63. 41. *Захарченко А.В.* Толщина смазочного слоя в трибосопряженнях як характеристика параметрів процесу // *Вісник НТУ "ХПІ"*. Збірник наукових праць. Серія: Проблеми механічного приводу. – Харків: НТУ "ХПІ", 2012. – №36. – С.59-67.

Bibliography (transliterated): 1. *Zaharchenko A.V.* Mehanicheskie svoystva i struktura tonkykh poverhnostnykh sloevyev tribosopryazheniy, obrazuemih prisadkami na poverhnostyakh treniya // *Visnyk NTU "KhPI"*. Zb. nauk. prac'. Ser.: "Problemy mehanichnogo pryvodu". – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – No31 (1074). –

P.41-52. **2. Kirpichenko Yu.E., Trofimenko A.F.** Osnovy tribologii. – Homel': Infotribo, 1995. – 224p. **3. Pogodaev L.I., Chulkin S.H., Dudko P.P., Kuz'min V.N.** Strukturno-energeticheskij podhod k ocenke vliyaniya smazochnih kompozicij na iznosostojkost' tribosopryazhenij. Ch.1. Strukturno-energeticheskaya model' iznashivaniya // Trenie i iznos. – 2001. – Vol. 22, No2. – P.168-172. **4. Kosteckij B.I., Kolesnichenko N.F.** Kachestvo poverhnosti i trenie v mashinah. – Kiev.: Tehnika, 1969. – 215p. **5. Bakly D.** Poverhnostnye yavleniya pri adgezii i frikcionnom vzaimodejstvii / Per. s angl. A.V. Belogo, N.K. Myskhina; Pod red. A.I. Sviridenka. – Moscow.: Mashinostroenie, 1986. – 360p. **6. Kuz'min N.N., Shuvalova E.A., Trankovskaya H.R., Murav'eva T.I.** Metody analiza struktur poverhnostej, formiruuyushchihsya v processe treniya // Trenie i iznos. – Vol.17, No4. – P.480-486. **7. Alekseev N.M., Kuz'min N.N., Trankovskaya H.R., Shuvalova E.A.** O samopodobii processov iznashivaniya na razlichnih masshtabnih urovnyah // Trenie i iznos. – 1992. – Vol.13, No1. – P.161-171. **8. Harbar I.I.** O strukture i stroenii poverhnostnih slojev sopryagennih materialov trushchihsya par // Trenie i iznos. – 1990. – Vol.11, No4. – P.581-593. **9. Kolesnikov Yu.V., Morozov E.M.** Mehanika kontaktnogo razrusheniya. – Moscow.: Nauka, 1989. – 276p. **10. Popov V.L., Kolubaev A.V.** Analiz mehanizmu formirovaniya poverhnostnyh slojev pri trenii // Trenie i iznos. – 1997. – Vol.18, No6. – S.818-826. **11. Mihin I.M.** Vneshnee trenie tvyerdyh tel. – Moscow.: Nauka, 1977. – 164p. **12. Kolesnykov Yu.V., Morozov E.M.** Mehanika kontaktnogo razrusheniya. – Moscow.: Izd. LKI, 2007. – 224p. **13. Parton V.Z., Morozov E.M.** Mehanika uprugoplasticheskogo razrusheniya: Osnovy mehaniki razrusheniya. – Moscow.: Izd. LKI, 2008. – 352p. **14. Totaj A.V.** Tehnologicheskoe obespechenie fizicheskikh i ekspluatacionnyh svoystv poverhnostnyh slojev detalej mashin // Trenie i iznos. – 1997. – Vol.18, No3. – P.385-394. **15. Bohdanovich P.N., Prushak V.Ya.** Trenie i iznos v mashinah. – Minsk.: Vish. shk., 1999. – 374p. **16. Kosteckaya N.B.** Mehanizmy strukturnoj prispособlivaemosti i upravlenie iznashivaniem mashin. – Kiev.: Naukova dumka, 1985. – 236p. **17. Ahmatov A.S.** Molekulyarnaya fizika granichnogo treniya. – Moscow.: Fizmatgiz, 1963. – 472p. **18. Poverhnostnaya prochnost' materialov pri trenii / B.I. Kosteckij, I.H. Nosovskij, A.K. Karaulov i dr.; Pod obshch. red. d-ra tehn. nauk B.I. Kosteckogo. – Kiev.: Tehnika, 1976. – 296p. **19. Mak-Lyn D.** Mehanicheskie svoystva metalla. – M.: Metallurgiya, 1965. – 394p. **20. Kosteckij B.I., Natanson M.E., Bershadjkij L.I.** Mehanohimicheskie processy pri granichnom trenii. – Moscow.: Nauka, 1972. – 172p. **21. Van-Byuren** Defekty v kristallah. – Moscow.: Inostrannaya literatura, 1962. – 328p. **22. Aleyhin V.P., Shorshorov M.H.** Vliyanie osobennostej mikroplasticheskoy deformacii vblizi svobodnoj poverhnosti tvyerdogo tela na obshchuyu kinetiku makroplasticheskoho techeniya // Fizika i himiya obrabotki materialov. – 1973. – No5. P.84-101. **23. Aleyhin V.P., Shorshorov M.H.** Strukturnie osobennosti kinetiki mikroplasticheskoy deformacii vblizi svobodnoj poverhnosti tvyerdogo tela // Fizika i himiya obrabotki materialov. – 1974. – No4. – P.107-121. **24. Ivanova V.M., Terent'ev V.F., Pojda V.H.** Osobennosti povedeniya poverhnostnogo sloya metallov pri razlichnyh usloviyah nagruzeniya // Metallofizika, vol.43. – Kiev.: Naukova dumka, 1972. – P.63-82. **25. Kramer L., Demer L.** Vliyanie sredy na mehanicheskie svoystva metallov. – Moscow.: Metallurgiya, 1964. – 88p. **26. Shorshorov M.H., Aleyhin V.P.** Vliyanie sredy i sostoyaniya poverhnosti na process plasticheskoy deformacii kristallov // Fizika i himiya obrabotki materialov – 1976. – No1. – P.61-76. **27. Bushe N.A., Kopytko V.V.** Sovmestimost' trushchihsya poverhnostej. – Moscow.: Nauka, 1981. – 128p. **28. Rygih N.P.** Issledovanie i ocenka protivoznosnyh svoystv antifrikcionnih splavov // Trudy KIHVF "Trenie, smazka i iznos detalej mashin", vol.3. – Kiev.: Izd. KIHVF, 1962. – P.78-81. **29. Kosteckij B.I., Bershadjkij L.L., Chukreev E.P.** Ob yavlenii samoregulirovaniya pri iznose metallov // DAN SSSR. – 1970. – Vol.190, No5. – P.1112-1114. **30. Kosteckij B.I., Bershadjkij L.I.** Dinamicheskoe ravnovesie pri trenii i iznose metallov // DAN SSSR. – 1970. – Vol.191, No6. – P.1337-1339. **31. Kosteckij B.I.** Evolyuciya strukturnogo i fazovogo sostoyaniya i mehanizmi samoorganizacii materialov pri vneshnem trenii // Trenie i iznos. – 1993. – Vol.14, No4. – P.773-783. **32. Kosteckij B.I.** Fundamental'naya zakonomernost' samoorganizacii tehniceskikh tribosistem // DAN USSR. Ser.A. – 1989. – No4. – P.52-57. **33. Fizika tvyerdogo tela: Encikloped. slov. Vol.1 / Sost.: V.H. Bar'yahtar, V.L. Vineckij, A.S. Bakaj i dr. – Kiev.: Nauk. dumka, 1996. – 652p. **34. Landau L.D.** O ravnovesnoj forme kristallov // Sb. trudov. Vol.2. – Moscow.: Nauka, 1969. – 408p. **35. Kosteckij B.I., Bershadjkij L.L., Aronov V.A.** // DAN SSSR. – 1970. – Vol.190, No6. – P.1337. **36. Mur D.** Osnovy i primeneniya tribologii / Per. s angl. S.A. Harlamova; Pod red. I.V. Kragel'skogo. – Moscow.: Mir, 1978. – 488p. **37. Palatnik L.S., Fuks M.Ya., Kosevich V.M.** Mehanizm obrazovaniya i substruktura kondensirovannyh plyenok. – Moscow.: Nauka, 1972. – 320p. **38. Alekseev N.M., Kuz'min N.N., Trankovskaya H.R., Shuvalova E.A., Chekina O.H.** Metodika issledovaniya smazochnogo dejstviya // Prakticheskaya tribologiya. – Moscow, 1994. – P.325-328. **39. Zaharchenko A.V.** Koefficient tertya v tribospoluchennyah yak golovnyj parametru procesu // Visnyk NTU "KhPI". Zb. nauk. prac'. Ser.: "Problemy mehanichnogo pryvodu". – Kharkiv: NTU "KhPI", 2009. – No19. – P.58-68. **40. Zaharchenko A.V.** Temperaturnyj kriterij v tribosopryazheniyah kak charakteristika parametrov processa // Visnyk NTU "KhPI". Zb. nauk. prac'. Ser.: "Problemy mehanichnogo pryvodu". – Kharkiv: NTU "KhPI", 2011. – No28. – P.53-63. **41. Zaharchenko A.V.** Tolschchina smazochnogo sloya v tribosopryazheniyah kak charakteristika parametrov processa // Visnyk NTU "KhPI". Zb. nauk. prac'. Ser.: "Problemy mehanichnogo pryvodu". – Kharkiv: NTU "KhPI", 2012. – No36. – P.59-67.****

Поступила (received) 19.03.2015

УДК 629.114.026:519.853.6

И.Ю. КЛИМЕНКО, ассистент каф. управления на транспорте ГВУЗ "НГУ", Днепропетровск;
И.А. ТАРАН, д.т.н., проф., заведующий каф. управления на транспорте ГВУЗ "НГУ";
М.Н. ТРУБИЦИН, к.т.н., доцент каф. управления на транспорте ГВУЗ "НГУ"

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПОИСКА РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСМИССИЙ ШАХТНЫХ ДИЗЕЛЕВАЗОВ МЕТОДАМИ ПРЯМОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Рассмотрены основная (максимальный КПД) и вспомогательные задачи (аппроксимация экспериментальных данных) оптимизации параметров гидромеханических трансмиссий шахтных локомотивов при помощи модифицированного симплексного метода Нелдера-Мида. Показана возможность нахождения локальных экстремумов на основе предварительного зондирования пространства; равномерного перебора начальных симплексов (при помощи ЛП-т сеток) и локализации найденных экстремумов с введением дополнительных ограничений на N -мерную область определения произвольной целевой функции.

Ключевые слова: гидромеханические трансмиссии шахтных дизелевозов, методы прямой оптимизации, симплексный метод Нелдера-Мида, локальные экстремумы, зондирование N -мерного пространства, ЛП-т сетки, область локализации экстремума, штрафные ограничения.

Введение. Любая инженерная задача подразумевает нахождение рациональных или оптимальных различных количественных, качественных (бинарных: 0; 1 – отсутствие или наличие рассматриваемого фактора), логических и др. параметров исследуемой машины. Поиск экстремального решения усложняется видом реальной (не поддающейся дифференцированию, разрывной, ступенчатой, целочисленной и пр.) целевой функции (ЦФ), сложностью описания ограничений, накладываемых на ее область определения (ОО), возможной взаимозависимостью отдельных параметров, и самое главное – отсутствием гарантии нахождения всего комплекса потенциальных решений, для последующего выбора нужного (глобального) решения. В данном контексте, не составляет исключения и задача, сформулированная в названии данной статьи. Решение ее непосредственно влияет на эффективность работы рельсового транспорта шахт, путем технического совершенства средств тяги – локомотивов, наиболее перспективные из которых – дизелевозы [1].

Актуальность задачи для отечественного машиностроения состоит в построении универсального алгоритма определения зависимостей формирования и передачи потоков мощности в элементах трансмиссий шахтного дизелевоза для повышения тяговых возможностей локомотива при неизменной установочной мощности его двигателя. Комплекс получаемых здесь решений позволит: разработать обобщенную интегральную систему критериев оценки эффективности вариантов трансмиссий; и получить новые технические решения по совершенствованию трансмиссии шахтного дизелевоза [2, 3]. Актуальность, с точки зрения прикладной математики, состоит в разработке последовательных вариантов поэтапного алгоритма впервые соединяющего: наиболее эффективную модификацию симплексного метода Нелдера-Мида [4]; зондирование исследуемого N -мерного пространства варьируемых факторов (при помощи ЛП-т сеток [5]); локализацию найденных экстремумов (внесением вновь построенных односвязных ограничений на ОО ЦФ); анализ найденных решений- экстре-

© И.Ю. Клименко, И.А. Таран, М.Н. Трубицин, 2015