

Єдинович Андрій Борисович – ДП "Івченко-Прогрес", ведучий інженер; тел.: (066) 238-70-62.

Єдинович Андрій Борисович – ГП "Івченко-Прогрес", ведучий інженер; тел.: (066) 238-70-62.

Edinovich Andrey Borisovich – SE "Ivchenko-Progress", lead engineer; tel.: (066) 238-70-62.

Папчонков Олександр Вікторович – АТ "Мотор Січ", заст. технічного директора з нових виробів; e-mail: papchonkov@gmail.com.

Папчонков Александр Викторович – АО "Мотор Сич", заместитель технического директора по новым изделиям; e-mail: papchonkov@gmail.com.

Papchonkov Aleksander Viktorovich – Motor Sich JSC, deputy technical director of new product; e-mail: papchonkov@gmail.com.

Колоколов Александр Володимирович – ДП "Івченко-Прогрес", інженер; e-mail: aleksanderkolokolov@gmail.com.

Колоколов Александр Владимирович – ГП "Івченко-Прогрес", інженер; e-mail: aleksanderkolokolov@gmail.com.

Kolokolov Aleksander Volobymyrovich – SE "Ivchenko-Progress", engineer; e-mail: aleksanderkolokolov@gmail.com.

УДК 620.178.16 : 621.892

А. В. ЗАХАРЧЕНКО

ИЗНАШИВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ СТРУКТУР ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ, ОБРАЗУЕМЫХ ПРИСАДКАМИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТРЕНИЯ

На підставі сучасних трибологічних джерел пропонується аналітичний огляд шляхів вирішення проблеми вибору за будовою, властивостями і складом вторинних структур тонких поверхневих шарів трибоспряжень визначеного мастильного матеріалу, який відповідає конкретним умовам експлуатації. Систематизовано вимоги для знаходження порогових значень результату сумісної дії теплових і механічних навантажень, коли поверхневі шари тіл, які труться, становляться хімічно і каталітично активними, що є необхідним для інтенсифікації процесів утворення ефективного хімічно модифікованого шару.

Ключові слова: вторинна структура, поверхня тертя, поверхневий шар, пакет присадок, хімічно активні речовини, хемосорбція, хімічно модифікований шар.

На основании современных трибологических источников предлагается аналитический обзор путей решения проблемы выбора по строению, свойствам и составу вторичных структур тонких 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: вторичная структура, поверхность трения, поверхностный слой, пакет присадок, химически активные вещества, хемосорбция, химически модифицированный слой.

On the basis of up-to-date tribology sources the analytical review of the ways to resolve the problem of choice accounting for the structure, property and composition secondary structures of superficial layers in the tribounits of an oil material appropriate for the specific conditions of maintenance is presented. The requirements are systematised for determining the threshold values for the outcome of joint action of thermal and mechanical load when the friction surfaces become chemically and catalytically active that is needed for the intensification of an effective chemically modified layer formation processes. Because of cooperating of the superficial layers activated by a friction with (lubricating) an environment on the surfaces of friction secondary structures which on a structure appear spontaneously, it is radically differed properties and composition from pre-product and are a new phase, possessing extreme antifriction and antiwear properties. In secondary structures accumulated 90-98 % energies of friction. In the certain range of speeds, loading and temperatures ("range of structural adaptability") coefficients of friction and wear in oftentimes below, than outside this range (a "normal" wear is carried out), and after his limits, passing is carried out to the mode of "pathological wear". It is explained by that in the range of structural adaptability processes of education and destruction of secondary structures on the surfaces of friction are in a dynamic equilibrium, and out of this range there is violation of this equilibrium, that conduces to passing either to the intensive adhesion wear or to the intensive corrosive-mechanical wear.

Keywords: secondary structure, friction surface, surface layer, additive package, chemically active substances, chemisorption, chemically modified layer.

Актуальность задачи. Одной из важнейших задач для обеспечения антифрикционных и противозносных свойств трибосопряжений является оптимизация концентрации пакетов присадок в базовых маслах [1]. Пути оптимизации концентрации химически активных веществ в маслах в настоящее время не являются до конца объективными благодаря их ориентированности только на физико-химические свойства самих масел в условиях поставки. Абсолютно не учитывается при определении эффективности и срока службы смазочных материалов (СМ) такой важный фактор, как влияние химического состава и эксплуатационных свойств масел на структурную однородность и микро-механические характеристики поверхностных слоёв трибосопряжений [2]. Определение оптимальной кон-

центрации пакетов присадок в маслах приведёт к их рациональному использованию, что даст существенную экономию горюче-смазочных ресурсов и конструктивных материалов в Украине [3].

Необходимость предлагаемой работы определяется значительной проблемой рационального использования новых высокоэффективных комплексных фосфор- и серосодержащих товарных пакетов присадок, используемых заводами-производителями нашей страны в качестве легирующих элементов при изготовлении товарных трансмиссионных масел (ТМ), имеющих значительную стоимость и не всегда соответствующих эксплуатационным требованиям и потребностью предприятий-эксплуатантов техники в современных ТМ отечественного производства для конкретных

условий роботи с позиции их влияния на физико-механические характеристики и состояние поверхностных слоёв трибосопряжений в условиях качения с проскальзыванием [4].

Постановка проблемы. В 1939 г. Б. В. Дерягин [5] показал, что плёнка СМ на поверхности трения подвергается износу. В 1962 г. И. В. Крагельский оценил удельный износ обычных масляных плёнок, он получил значение 5×10^{-10} [6]. А. К. Зайцев высказывал мнение [7], что процесс износа тел при трении чрезвычайно сложен и зависит от многих факторов. Уже небольшие изменения в условиях износа вносят заметные, а часто весьма значительные изменения в величину и характер износа, причём, хотя износ и связан с основными свойствами материалов и их состоянием, но всё же само явление следует рассматривать особо. Поэтому износ, по его мнению, нельзя заранее вычислить. Его нужно рассматривать как самостоятельную динамическую характеристику и изучать путём непосредственных опытов. Оценивая состояние проблемы износа, В. Д. Кузнецов пришёл к заключению, что кроме чистого эмпиризма, в этой области ничего нет, никаких обобщений сделать невозможно, наука находится на крайне низком уровне. Отдельные ярко выдающиеся примеры высокой износоустойчивости выдвинула практика, а теория оказалась бессильной их объяснить [8].

Анализ последних исследований и публикаций следует начать с того, что несмотря на большую актуальность химии присадок и значительный объём проделанных исследований, монографическая литература

по строению, свойствам и составу поверхностных слоёв в зависимости от состава смазочных сред крайне бедна. Теоретическое исследование [9] посвящено определению давления и выяснению механизма разрушения смазочной плёнки между гребнями шероховатости в линейном контакте роликов в случае чистого качения и качения с проскальзыванием, когда гребни шероховатости имеют синусоидальную форму и их профиль изменяется случайно. Известно, что поверхностное разрушение деталей машин является термодинамически неизбежным следствием процессов, развивающихся в узлах трения. Схема классификации видов изнашивания и повреждаемости по Б. И. Костецкому показана на рис. 1 [10].

Наиболее общей закономерностью следует считать локализацию разрушения в тонких слоях вторичных структур (ВС) порядка сотен ангстрем и метастабильное состояние поверхностей трения как необходимые условия протекания нормального износа [11]. В области граничной смазки трение происходит в граничном слое, а между процессами образования и разрушения поверхностных плёнок в этой области устанавливается устойчивое равновесие (о гипотезе равновесия приведено в [6]). При нормальном установившемся трении и износе структурные изменения металла локализованы в поверхностных слоях до 5 мкм (при граничном трении) [11]. Процессы изнашивания и повреждаемости отличаются по качественным и количественным характеристикам и могут быть идентифицированы по результатам исследования поверхностей трения (табл. 1) [10].

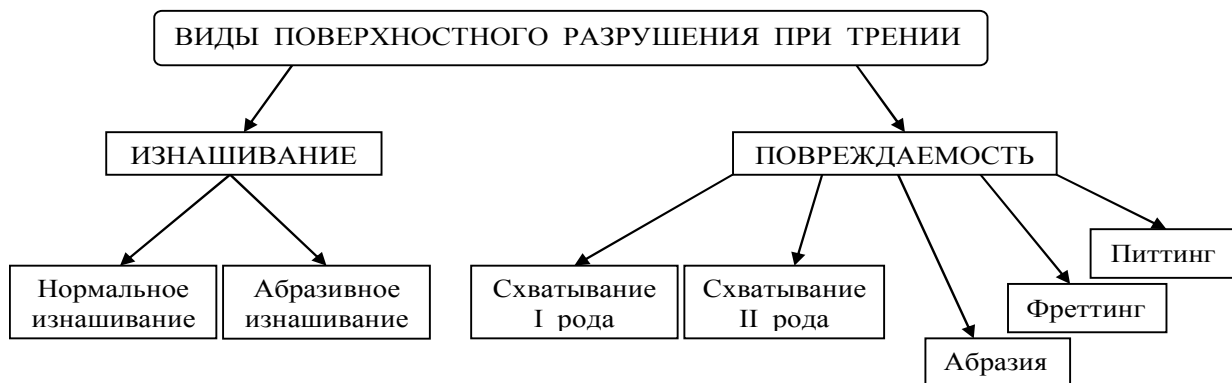


Рис. 1 – Классификация видов поверхностного разрушения при трении (Б. И. Костецкий) [10]

Таблица 1 – Характеристики процессов изнашивания и повреждаемости при трении [10]

Процессы изнашивания и повреждаемости	Коэффициент трения	Глубина разрушающегося слоя, мм	Изменение фазового состава и структуры поверхностных слоёв	Относительное изменение твёрдости поверхностных слоёв
Нормальное изнашивание	0,005–0,1	0,0001–0,001	Образование вторичных структур	3–10
Абразивное изнашивание	0,05–0,3	До 0,001	Образование вторичных структур	3–10
Фреттинг	0,1–1,0	До 0,5	Наклёп и динамическое окисление	1,5–5
Схватывание II рода	0,1–1,0	До 1,0	Вторичные закалка и/или отпуск	0,3–5
Схватывание I рода	0,5–40	До 3–4	Наклёп	1,5–4
Абразия	–	До 0,5	Наклёп	1–2

С позиций системного анализа в [12] обобщены результаты исследований воздействия трения на материал поверхностного слоя и обоснован масштабный уровень наиболее существенных процессов, определяющих износостойкость поверхностей трения. Исследование механизмов изнашивания, по мнению авторов [13], включает три этапа: 1 – наблюдение за внешними

проявлениями износа; 2 – феноменологическое описание износа; 3 – корреляция с возможными механизмами изнашивания. В отличие от исследования изношенных поверхностей и подповерхностной деформации, в настоящее время не практикуется сравнительный анализ явлений, связанный с частицами износа.

Процессы пластической деформации тонких слоёв металла под действием СМ обуславливают диффузионную активность металла и, таким образом, оказывают существенное влияние на его химическое модифицирование. Процессы минимизации пластических деформаций достаточно широко реализуются при нормальном трении деталей машин и характеризуются минимальными значениями скорости износа и отсутствием любых видов повреждаемости [11]. Локализация пластических деформаций в тончайших поверхностных слоях является одной из причин минимизации скорости износа при нормальном трении. Это объясняется тем, что разрушение достигается только после предельного упрочнения всего разрушаемого слоя (аморфизация и насыщение агрессивным компонентом среды) [11]. Например, в [14] рассматриваются перспективы использования для процессов пластического формоизменения металла смазочной композиции PL61, которая благодаря специальным присадкам способна распределяться по поверхностям трения в виде тонких смазочных плёнок, обладает противоизносным действием и антикоррозионным эффектом, облегчает процесс пластической деформации и способна работать при температурах до 160 °С.

Целью исследований [15] является дальнейшее развитие структурно-энергетической концепции поверхностного разрушения материалов с различными структурами и последующего прогнозирования на их основе ресурса трибосопряжений с учётом условий эксплуатации и применение её основных положений к условиям внешнего трения при скольжении, качении с проскальзыванием и резании материалов. Авторами [16] предложен теоретико-инвариантный метод расчёта интенсивности поверхностного разрушения твёрдых тел при трении, который базируется на уравнениях эластогидродинамической теории смазки, химической кинетики, контактной задачи теории упругости, теории прочности, анализе теплофизических, адсорбционных и диффузионных процессов.

Обычно изнашивание трактуется как "нежелательное удаление материала с поверхности трения в результате химического или механического воздействия". Другое определение описывает изнашивание как "нарастающую потерю материала с рабочей поверхности тела в результате движения по этой поверхности другого тела". Для понимания природы изнашивания сформулированы законы, разработаны различные механизмы и теории, знания систематизированы в соответствии с многочисленными схемами классификации. Самую общую классификацию изнашивания можно выполнить на основе результатов изнашивания и природы основных процессов, протекающих при изнашивании. В классификации Д. Даусона [17], например, одна из категорий является весьма наглядной при описании изношенных поверхностей и в некоторой степени отражает механизмы изнашивания. Другая категория основана исключительно на процессах изнашивания. Однако общепринятая классификация изнашивания исключает все связанные с частицами износа явления. В [13] дана расширенная классификация видов изнашивания для охватываемых, связанных с продуктами износа. Там же выполнена расширенная классификация видов изнашивания, охватывающая в дополнение к поверхностным явлениям и процессам изнашивания явления, в которые вовлечены частицы износа. А ведь механизм изнашивания для одной и той же пары трения может меняться в зависимости от состава среды, в которой протекает трение [6]. Об этом

свидетельствует, в частности, химический состав частиц износа, которые могут состоять как из исходных материалов, так и продуктов их взаимодействия с окружающей средой, в том числе и со СМ. Один из наиболее распространённых видов изнашивания – окислительный износ [6].

Сейчас актуальны исследования по выявлению состава, характера и свойств плёнок, образуемых присадками на поверхностях трения. Так, исследования химического состава продуктов изнашивания, позволяющие судить о характере плёнок, показали [18], что состав продуктов износа зависит прежде всего от интенсивности изнашивания. При большом износе образуются неорганические продукты, состоящие в основном из карбида железа, оксидов и полимеров трения (содержащих комплексы железа). При незначительном износе образуются органические продукты полимерного характера, содержащие ненасыщенные углеводороды, карбоновые кислоты, эфиры [18]. По утверждению авторов [19], чтобы уменьшить износ подшипников, необходимо уменьшить окисление металла на поверхностях трения, так как окислы "стираются" и "смываются" легче, чем основной металл подшипника.

Исходя из допущения о том, что поверхностные слои на неровностях, образующиеся при трении материала и одновременном химическом взаимодействии с окружающей средой, отрываются, достигая некоторой критической толщины, Квинн предложил гипотезу окислительного изнашивания сталей [20]. Хотя трудно провести надёжные расчёты интенсивностей изнашивания из-за неопределённости некоторых величин, приведённые в ней выражения могут служить физической картины механизма коррозионно-механического изнашивания (КМИ). Окислительное изнашивание является частным случаем КМИ. Протекает оно в условиях, когда металл вступает в химическую реакцию с окислителями окружающей среды или СМ и происходит, когда скорость образования плёнок оксидов больше или равна скорости их разрушения. В противном случае возможно протекание других видов изнашивания, например адгезионного [21]. Критика существующих концепций, основанных на применении теории вероятностей, дана в [22]. Предлагаемая концепция основана на предположении, что в каждой площадке соприкосновения двух трущихся тел радиусом "a" имеется меньшая площадка радиусом "b", с которой отрывается частица. Константа "Z" в формуле закона Хольма ($W = Z \cdot P \cdot I / p$, W – величина изнашивания, P – нагрузка, I – длина трения, p – величина, зависящая от твёрдости) является функцией отношения b/a , зависящего в свою очередь от характера смазки [22].

По мнению А. К. Караулова [10] наиболее распространённым, но ошибочным, является представление о так называемом "КМИ". Большинство деталей машин работает периодически, в условиях механохимического изнашивания, где износостойкость будет зависеть, в первую очередь, от свойств ВС, образующихся в процессе трения. А кинетика процессов при механохимическом изнашивании при трении существенным образом отличается от кинетики процессов химической и электрохимической коррозии [10].

С процессом термических разложений присадок непосредственно связан механизм их действия. Химические реакции между молекулами присадок и продуктами их термических превращений, протекающие при высоких контактных температурах трения, приводят к образованию на поверхностях трения химически моди-

фицированных слоёв, обладающих пониженной (по сравнению с основным металлом) прочностью на сдвиг и вследствие этого обеспечивающих снижение трения и замену интенсивного адгезионного износа более мягким КМИ [23]. Который происходит в условиях воздействия окружающей среды и динамических взаимодействий между элементами [24]. Другими словами, если две поверхности активно реагируют с окружающей средой, их трение в этой среде приводит к непрерывному образованию и отделению продуктов реакции. Поверхности теряют материал, поскольку он содержится в продуктах реакции [20]. В случае КМИ механизм в целом, очевидно, состоит из взаимодействия трёх элементов: двух твёрдых тел и окружающей среды. Эти взаимодействия могут быть представлены как циклический ступенчатый процесс:

1. На первом этапе поверхности твёрдых тел реагируют с окружающей средой. В этом процессе образуются продукты реакции веществ на поверхностях твёрдых тел.

2. Второй этап представляет собой истирание продуктов реакции в результате образования трещин и абразивного износа при контактных взаимодействиях двух твёрдых тел. При этом возникают "свежие", т.е. реагирующие, участки поверхностей твёрдых тел, и начинается первый этап [20].

Характер фрикционного взаимодействия при граничной смазке определяется соотношением двух одновременно протекающих процессов образования и разрушения граничного смазочного слоя [25]. Указанные явления имеют большое практическое значение. Однако они лишь несколько модифицируют, но не меняют основное представление о механизме разрушения граничного смазочного слоя. Данная точка зрения поддерживается в работах других исследователей [26]. Обсуждая химические аспекты фрикционного взаимодействия, необходимо учитывать как влияние окружающей среды, так и химические реакции между контактирующими поверхностями [27].

Как показано Болдуином [28], при трении на поверхности стали обнаруживается плёнка сульфидов, которая отсутствует в статических испытаниях. Данные Болдуина были подтверждены Бердом и Галвином [29]. Сравнение спектров позволяет сделать вывод о существенных различиях в механизме поверхностных реакций при различных видах механического воздействия на металл в реакционно-способной среде. Нагрузочно-скоростной режим при этом как бы управляет химией поверхностных реакций [27]. Авторами [30] приводятся результаты исследования кинетики трибохимических реакций в ряде сред и выявлены определённые количественные закономерности в протекании рассмотренных трибохимических процессов. Выявленные колебания характеристик износа также объясняются ходом химических процессов [6].

Скорость химических реакций на поверхностях твёрдых тел зависит от концентрации реагентов, температуры, фазового состояния, давления, времени протекания химического процесса [31]. Поскольку температура на пятнах фактического контакта может достигать температуры плавления одного из сопрягаемых тел и определять скорость протекания химических реакций, важно проследить её влияние на КМИ металлов [21]. В таких случаях наличие смазки может усложнить анализ по сравнению с несмазанной системой, поскольку образующиеся продукты реакции сложны и трудно поддаются определению и поскольку главные трудности могут заключаться в нестационарности условий [20].

При сравнительно низких температурах образуются металлические мыла, защищающие поверхности металла, в то время как при более высоких температурах в результате взаимодействия присадок с металлом образуются неорганические соли (которые могут быть хлоридами, сульфидами, фосфидами и фосфатами в зависимости от природы присадки). В последнем случае реакции становятся эффективными по истечении некоторого времени, и, к счастью, скорость реакции на практике в большинстве случаев (например, в случае передаточных механизмов) достаточно высока, чтобы обеспечить надлежащую защиту. Окисление металлических поверхностей может играть важную роль в ускорении химических изменений смазки, которые часто приводят к образованию плёнки полимеризованного материала на самих металлических поверхностях [32]. Даже в одной и той же среде только изменение длительности её контакта с поверхностью твёрдого тела приводит к образованию различных соединений [27].

В [33–36] рассматриваются в большей мере СМ, присадки к ним и приводятся закономерности трения и изнашивания и граничных условий применимости различных сред при сравнительно незначительном учёте типа трущихся материалов [37]. Но исследование реальных процессов граничного трения требует учёта совместного взаимодействия с металлом поверхностно активных и химически активных компонентов СМ [11].

Приведенные данные о влиянии различных факторов на КМИ металлов показывают, что коррозия в трибосопряжениях может играть двойственную роль. При оптимальной скорости протекания коррозионных процессов в зоне контакта на поверхностях трения сопрягаемых тел образуются химически модифицированные слои и их износостойкость повышается. В случае превышения оптимума на поверхностях трения образуются толстые слои продуктов химического взаимодействия, которые легко разрушаются. Это обеспечивает высокую интенсивность изнашивания трущихся тел вплоть до перехода к катастрофическому износу. Факторами, определяющими возможность перехода к неуправляемому процессу КМИ, являются коэффициент трения, скорость скольжения и нагрузка, которые обуславливают интенсивность потока тепловой энергии, выделяемой при трении [21]. При перегрузках, не превышающих $P_{кр}$ (нагрузка) или $V_{кр}$ (скорость скольжения), процессы разрушения всегда компенсируются процессами восстановления ВС [11].

Внешние воздействия при трении неизбежно приводят к деструкции – разрушению ВС, однако эти же воздействия и обмен веществом со средой обеспечивают их постоянную регенерацию – восстановление. Основой кинетического условия самоорганизации материалов трибосистем является согласованность скоростей образования ВС и разрушения: $V_{обр. ВС} = V_{разр. ВС}$.

Важная кинетическая характеристика самоорганизации трибосистем – периодичность циклов образования, стабилизации и разрушения ВС – $\sigma_{ВС}$ [38].

Вполне самодостаточную концепцию протекания трибохимических процессов без рассмотрения конкретных механизмов их реализации выдвинул Б. И. Костецкий [39]. Вследствие взаимодействия активированных трением поверхностных слоёв с окружающей (в том числе смазочной) средой на поверхностях трения спонтанно образуются ВС, которые по строению, свойствам и составу коренным образом отличаются от исходных материалов и представляют собой новую фазу (тонкоплёночный объект), обладающую экстремальными

антифрикционными и противозносными свойствами. Во ВС аккумулируется 90-98 % энергии трения [40].

Предлагаемая статья И. А. Буяновского [41] завершает цикл публикаций о современном развитии исследований в области граничной смазки при трении металлов и сплавов. А изложенные выше факты показывают, что разрушение граничного смазочного слоя при трении – достаточно сложный процесс.

Выводы. В определённом диапазоне скоростей, нагрузок и температур ("диапазон структурной приспособляемости") коэффициенты трения и износ во много раз ниже, чем за пределами этого диапазона (осуществляется "нормальное" изнашивание), а за его пределами осуществляется переход в режим "патологического изнашивания". Это объясняется тем, что в диапазоне структурной приспособляемости процессы образования и разрушения ВС на поверхностях трения находятся в динамическом равновесии, а вне этого диапазона происходит нарушение этого равновесия, что ведёт к переходу либо к интенсивному адгезионному изнашиванию, либо к интенсивному КМИ. В конечном счёте, постулируется наличие явления самоорганизации трибосистем в процессе трения.

Список литературы

1. Захарченко А. В. Проблема оптимізації концентрації хімічно активних речовин у трансмісійних оливах // Вісник Національного авіаційного університету. – К. : НАУ, 2005. – № 1. – С. 120–125.
2. Захарченко А. В. Влияние концентрации химически активных веществ на смазочное действие и состояние поверхностных слоёв трибосопрежений // Пр. 5-ї Міжнар. наук.-техн. конф. "Матеріали для роботи в екстремальних умовах". – К. : НТУ "КПІ", 2015. – С. 277–280.
3. Запорожець В. В., Білякович О. М., Захарченко А. В. Протизносні властивості мастильних середовищ у присутності хімічно активних речовин // Пр. Міжнар. наук. конф. "Наука і молодь". – К. : НАУ, 2001. – С. 13.
4. Оптимізація концентрації хімічно активних присадок у трансмісійних оливах вітчизняного виробництва: Звіт про НДР (завершал.) / Національний авіаційний університет. – 013–ДБ01; № ДР 0101V002732; Інв. № 0204U000857. – К., 2003. – 72 с.
5. Дєрягин Б. В., Лазарев В. П. Применение обобщённого закона трения к граничной смазке и механическим свойствам смазочного слоя // Трение и износ в машинах. – Т. 3. – М.–Л. : АН СССР, 1949. – С. 106–124.
6. Польцер Г., Майсснер Ф. Основы трения и изнашивания. – М. : Машиностроение, 1984. – 264 с.
7. Зайцев А. К. Основы учения о трении, износе и смазке машин. – Ч. 2. – М.–Л. : Машгиз, 1947. – 164 с.
8. Физика твёрдого тела. – Т. 4. Материалы по физике внешнего трения, износа и внутреннего трения твёрдых тел. – Томск : Полиграфиздат, 1947. – 542 с.
9. Ichimaru Kazunori, Du Xiaofei. Nihon kikai gakkai ronbunshu // Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. C. – 2000. – Vol. 66, No 649. – P. 3136–3142. (Взаимодействие гребней шероховатости при контактно-гидродинамической смазке.)
10. Караулов А. К., Худойли Н. Н. Автомобильные масла. Моторные и трансмиссионные. Ассортимент и применение: Справочник. – К. : Журнал "Радуга", 2000. – 436 с.
11. Костецкий Б. И., Натансон М. Э., Бершадский Л. И. Механохимические процессы при граничном трении. – М.: Наука, 1972. – 172 с.
12. Громаковский Д. Г. Разрушение поверхностей при трении и разработка кинетической модели изнашивания // Вестник машиностроения. – 2000. – № 1. – С. 3–9.
13. Унчун Чо. Феноменологический подход к анализу частиц износа // Трение и износ. – 2000. – Т. 21, № 3. – С. 258–263.
14. Ein Konzept für Späne und KSS // Produktion. Sonderausg. – 1999. – S. 26. (Смазочный материал PL61.)
15. Чулкин С. Г. Прогнозирование долговечности трибосопрежений на основе структурно-энергетической концепции изнашивания: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.04 / С.-Петербург. гос. ун-т вод. коммуникаций. – СПб., 1999. – 52 с.
16. Дроздов Ю. Н. Прогнозирование изнашивания с учётом механических, физико-химических и геометрических факторов // Трение и износ. – 2002. – Т. 23, № 3. – С. 252–257.
17. Dowson D. History of Tribology. – N.-Y.: Longman, 1979. – 677 p.
18. Кулиев А. М. Химия и технология присадок к маслам и топливам. – Л. : Химия, 1985. – 312 с.
19. Коковихин В. А. Пассивация поверхностей трения при создании

- электрических разрывов на сопрягаемых поверхностях // Вестник машиностроения. – 2001. – № 4. – С. 64.
20. Чихос Х. Системный анализ в трибонике. – М.: Мир, 1982. – 352 с.
 21. Боданович П. Н., Прушак В. Я. Трение и износ в машинах. – Мн. : Выш. шк., 1999. – 374 с.
 22. Sasada Taashi. Chiba kogyo daigaku kenkyu hokoku // Rept. Chiba Inst. Technol. – 2001. – № 48. – P. 25-30. (Невероятная интерпретация константы в формуле закона изнашивания.)
 23. Белов П. С., Матвеевский П. М., Буяновский И. А. Смазочная способность серы, азота и кислородосодержащих соединений в минеральных маслах // Трение и износ. – 1991. – Т. 12, № 3. – С. 561–563.
 24. Thiessen P. A., Meyer K., Heinicke G. Grundlagen der Tribochemie. – Berlin: Akademie-Verlag, 1967. – S. 284.
 25. Курпиченко Ю. Е., Трофименко А. Ф. Основы трибологии: Теория. Лабораторный практикум. Упражнения. – Гомель : Инфотрибо, 1995. – 224 с.
 26. Матвеевский П. М. Температурная стойкость граничных смазочных слоёв и твёрдых смазочных покрытий при трении металлов и сплавов. – М. : Наука, 1971. – 228 с.
 27. 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. – 360 с.
 28. Baldwin A., Bernard A. Chemical Characterization of Wear Surfaces Using X-Ray Photoelectron Spectroscopy // Lubr. Eng. – 1976. – Vol. 32, No 3. – P. 125-130.
 29. Bird R. J., Galvin G. D. The Application of Photoelectron Spectroscopy to the Study of E. P. Films on Lubricated Surfaces // Wear. – 1976. – Vol. 37. – P. 132–167.
 30. Олександренко В. П., Белянский В. П. Исследование закономерностей трибохимических реакций // Проблемы трибологии. – 1996. – № 1. – С. 101–111.
 31. Трение и износ в экстремальных условиях: Справочник / Ю. Н. Дроздов, В. Г. Павлов, В. Н. Пучков. – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.
 32. Мур Д. Основы и применения трибоники: Пер. с англ. С. А. Харламова; Под ред. И. В. Крагельского. – М. : Мир, 1978. – 488 с.
 33. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения. – М. : Физматгиз, 1963. – 472 с.
 34. Виноградова И. Э. Противозносные присадки к маслам. – М. : Химия, 1972. – 272 с.
 35. Дєрягин Б. В., Кротова Н. А. Адгезия. – М.–Л. : АН СССР, 1949. – 244 с.
 36. Розенберг Ю. А. Влияние смазочных масел на надёжность и долговечность. – М. : Машиностроение, 1970. – 312 с.
 37. Буше Н. А., Копытько В. В. Совместимость трущихся поверхностей. – М. : Наука, 1981. – 128 с.
 38. 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.
 39. Поверхностная прочность материалов при трении / Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, А. К. Караулов и др.; Под ред. Б. И. Костецкого. – К. : Техніка, 1976. – 296 с.
 40. Современная трибология: Итоги и перспективы / Э. Д. Браун, И. А. Буяновский, Н. А. Воронин и др.; Под ред. К. В. Фролова. – М. : Изд-во ЛКИ, 2008. – 480 с.
 41. Буяновский И. А. Учение о граничной смазке: восьмидесять-девятилетие годы // Химия и технология топлив и масел. – 1999. – № 2. – С. 45–48.

References (transliterated)

1. Zakharchenko A. V. Problema optimizatsii konsentratsii khimichno aktivnykh rechovin u transmisiyynikh olivakh [An optimisation problem of chemically active substances concentration in gear oils]. *Visnik Natsional'nogo aviatsiynogo universitetu* [Bulletin of the National Aviation University]. Kiev, NAU Publ., 2005, no. 1, pp. 120–125.
2. Zakharchenko A. V. Vliyanie konsentratsii khimicheskii aktivnykh veshchestv na smazochnoe deystvie i sostoyanie poverkhnostnykh sloev tribosopryazheniy [Influence of concentration chemically of active matters on a lubricating action and state of superficial layers of tribounits]. *Pratsi 5 Mizhnar. nauk.-texn. konf. "Materiali dlya roboti v ekstremal'nikh umovakh"* [Proc. 5 of the Int. Scient.-tech. Conf. "Materials for use in extreme conditions"]. Kiev, NTU "KPI" Publ., 2015, pp. 277–280.
3. Zaporozhets' V. V., Bilyakovich O. M., Zakharchenko A. V. Protiznosni vlastivosti mastil'nikh seredovishch u prisutnosti khimichno aktivnykh rechovin [Antiwear properties of lubricating environments are in presence chemically active matters]. *Pratsi Mizhnar. nauk. konf. "Nauka i molod"* [Proc. of the Int. Scient. Conf. "Science and youth"]. Kiev, NAU Publ., 2001, p. 13.
4. Optimizatsiya konsentratsii khimichno aktivnykh prisadok u transmisiyynikh olivakh vitchiznyanogo virobnytstva [Optimization of concentration chemically active additives is in transmission oils of domestic production]. *Zvit pro NDR (zavershal.)* [Report on research work (final)]. Kiev, NAU, 2003, 013-SB01, no. SR 0101V002732, no. inv. 0204U000857. 72 p.
5. Deryagin B. V., Lazarev V. P. Primenenie obobshchennogo zakona treniya k granichnoy smazke i mekhanicheskim svoystvam smazochnogo sloya [Application of the generalized law of friction to the

- border greasing and mechanical properties of lubricating layer]. *Trenie i iznos v mashinakh*. T. 3 [A friction and wear is in machines. Vol. 3]. Moscow-Leningrad, AN SSSR Publ., 1949, pp. 106–124.
6. Poltser G., Mayssner F. *Osnovy treniya i iznashivaniya* [Bases of friction and wear]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 264 p.
 7. Zaytsev A. K. *Osnovy ucheniya o trenii, iznose i smazke mashin. Ch. 2* [Bases of studies about a friction, wear and greasing of machines. P. 2]. Moscow-Leningrad, Mashgiz Publ., 1947. 164 p.
 8. *Fizika tverdogo tela. T. 4* [Physics of solid. Vol. 4]. *Materialy po fizike vneshnego treniya, iznosa i vnutrennego treniya tverdykh tel* [Materials on physics of external friction, wear and internal friction of solids]. Tomsk, Poligrafizdat Publ., 1947. 542 p.
 9. Ichimaru Kazunori, Du Xiaofei. Vzaimodeystvie grebney sherokhovatosti pri kontaktno gidrodinamicheskoy smazke [Co-operation of combs of roughness at the pin-hydrodynamic greasing]. *Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. C*. 2000, vol. 66, no. 649, pp. 3136–3142.
 10. Karaulov A. K., Khudoliy N. N. *Avtomobil'nye masla. Motornye i transmissionnye. Assortiment i primeneniye: Spravochnik* [Motor-car oils. Motor and transmission. Assortment and application: reference Book]. Kiev, Zhurnal "Raduga" Publ., 2000. 436 p.
 11. Kostetskiy B. I., Natanson M. E., Bershadskiy L. I. *Mekhanokhimicheskie protsessy pri granichnom trenii* [Mekhanokhimicheskie processes at a boundary friction]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 172 p.
 12. Gromakovskiy D. G. Razrushenie poverkhnostey pri trenii i razrabotka kineticheskoy modeli iznashivaniya [Destruction of surfaces at a friction and development of kinetic model of wear]. *Vestnik mashinostroeniya*. 2000, no. 1, pp. 3–9.
 13. Unchung Cho. Fenomenologicheskii podkhod k analizu chastits iznosa [Phenomenological going near the analysis of particles of wear]. *Trenie i iznos*. 2000, vol. 21, no. 3, pp. 258–263.
 14. Ein Konzert für Späne und KSS. *Produktion. Sonderausg.* 1999, p. 26. (Smazochnyy material PL61.)
 15. Chulkin S. G. *Prognozirovanie dolgovechnosti tribosopryazheniy na osnove strukturno energeticheskoy kontseptsii iznashivaniya: Avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.02.04* [Prognostication of longevity of tribounits on the basis of structurally-power conception of wear: Abstract of a thesis dr. eng. sci. diss. 05.02.04]. Saint Petersburg, 1999. 52 p.
 16. Drozdov Yu. N. Prognozirovanie iznashivaniya s uchedom mekhanicheskikh, fiziko khimicheskikh i geometricheskikh faktorov [Prognostication of wear taking into account mechanical, physical and chemical and geometrical factors]. *Trenie i iznos*. 2002, vol. 23, no. 3, pp. 252–257.
 17. Dowson D. *History of Tribology*. New York, Longman Publ., 1979. 677 p.
 18. Kuliev A. M. *Khimiya i tekhnologiya prisadok k maslam i toplivam* [Chemistry and technology of additives to oils and fuels]. Leningrad, Khimiya Publ., 1985. 312 p.
 19. Kokovikhin V. A. Passivatsiya poverkhnostey treniya pri sozdaniy elektricheskikh razryvov na sopryagaemykh poverkhnostyakh [Passivatsiya of surfaces of friction at creation of electric rozryadov on the attended surfaces]. *Vestnik mashinostroeniya*. 2001, no. 4, p. 64.
 20. Chikhos Kh. *Sistemnyy analiz v tribonike* [An analysis of the systems is in tribonike]. Moscow, Mir Publ., 1982. 352 p.
 21. Bogdanovich P. N., Prushak V. Ya. *Trenie i iznos v mashinakh* [A friction and wear is in machines]. Minsk, Vysh. shk. Publ., 1999. 374 p.
 22. Sasada Taashi. Unprobabilistic interpretation of constant is in the formula of law of wear. *Rept. Chiba Inst. Technol.* 2001, no. 48, pp. 25–30.
 23. Belov P. S., Matveevskiy R. M., Buyanovskiy I. A. Smazochnaya sposobnost' sery, azota i kislorodododerzhashchikh soedineniy v mineral'nykh maslakh [Lubricating ability of sulphur, nitrogen and oxygen containing connections in mineral oils]. *Trenie i iznos*. 1991, vol. 12, no. 3, pp. 561–563.
 24. Thiessen P. A., Meyer K., Heimicke G. *Grundlagen der Tribochemie*. Berlin, Akademie Verlag Publ., 1967, p. 284.
 25. Kirpichenko Yu. E., Trofimenko A. F. *Osnovy tribologii: Teoriya. Laboratornyy praktikum. Uprazhneniya* [Bases of tribology: Theory. Laboratory practical work. Exercises]. Gome'l, Infotribo Publ., 1995. 224 p.
 26. Matveevskiy R. M. *Temperaturnaya stoykost' granichnykh smazochnykh sloev i tverdykh smazochnykh pokrytiy pri trenii metallov i splavov* [Temperature firmness of border lubricating layers and hard lubricating coverages at the friction of metals and alloys]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 228 p.
 27. Bakli D. *Poverkhnostnye yavleniya pri adgezii i friktsionnom vzaimodeystvii* [Superficial phenomena at adgezii and friction co-operation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 360 p.
 28. Baldwin A., Bernard A. Chemical Characterization of Wear Surfaces Using X-Ray Photoelectron Spectroscopy. *Lubr. Eng.* 1976, vol. 32, no. 3, pp. 125–130.
 29. Bird R. J., Galvin G. D. The Application of Photoelectron Spectroscopy to the Study of E. P. Films on Lubricated Surfaces. *Wear*. 1976, vol. 37, pp. 132–167.
 30. Oleksandrenko V. P., Belyanskiy V. P. *Issledovanie zakonomernostey tribokhimicheskikh reaktsiy* [Research of conformities to law of tribochemical reactions]. *Problemi tribologii*. 1996, no. 1, pp. 101–111.
 31. Drozdov Yu. N., Pavlov V. G., Puchkov V. N. *Trenie i iznos v ekstremal'nykh usloviyakh: Spravochnik* [A friction and wear is in extreme terms: reference Book]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 224 p.
 32. Mur D. *Osnovy i primeneniya triboniki* [Bases and applications of triboniki]. Moscow, Mir Publ., 1978. 488 p.
 33. Akhmatov A. S. *Molekulyarnaya fizika granichnogo treniya* [Molecular physics of boundary friction]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963. 472 p.
 34. Vinogradova I. E. *Protivoiznosnye prisadki k maslam* [Antiwear additives to oils]. Moscow, Khimiya Publ., 1972. 272 p.
 35. Deryagin B. V., Krotova N. A. *Adgezija* [Adhesion]. Moscow-Leningrad, AN SSSR Publ., 1949. 244 p.
 36. Rozenberg Yu. A. *Vliyaniye smazochnykh masel na nadezhnost' i dolgovechnost'* [Influence of luboils on reliability and longevity]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 312 p.
 37. Bushe N. A., Kopyt'ko V. V. *Sovmestimos' trushchikhsya poverkhnostey* [Compatibility of the ground surfaces]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 128 p.
 38. Kostetskiy B. I. Evolyutsiya strukturnogo i fazovogo sostoyaniya i mekhanizmy samoorganizatsii materialov pri vneshnem trenii [Evolution of the structural and phase state and mechanisms of self-organization of materials at an external friction]. *Trenie i iznos*. 1993, vol. 14, no. 4, pp. 773–783.
 39. Kostetskiy B. I., Nosovskiy I. G., Karaulov A. K. *Poverkhnostnaya prochnost' materialov pri trenii* [Superficial durability of materials at a friction]. Kiev, Tekhnika Publ., 1976. 296 p.
 40. Frolov K. V., Braun E. D., Buyanovskiy I. A., Voronin N. A. *Sovremennaya tribologiya: Itogi i perspektivy* [Modern tribology: Results and prospects]. Moscow, LKI Publ., 2008. 480 p.
 41. Buyanovskiy I. A. *Uchenie o granichnoy smazke: vos'midesyatyey devyanyaste gody* [Studies about the boundary greasing: the eightieth-ninety]. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel*. 1999, no. 2, pp. 45–48.

Поступила (received) 30.05.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Зношування вторинних структур поверхневих шарів, що утворюються присадками на поверхнях тертя / А. В. Захарченко // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – X. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 25 (1247). – С. 56–61. – Библиогр.: 41 назв. – ISSN 2079-0791.

Изнашивание вторичных структур поверхностных слоёв, образуемых присадками на поверхностях трения / А. В. Захарченко // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми механічного приводу. – X. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 25 (1247). – С. 56–61. – Библиогр.: 41 назв. – ISSN 2079-0791.

Wear of secondary structures of superficial layers, formed by additives on the surfaces of friction / A. V. Zakharchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problem of mechanical drive. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 25 (1247). – P. 56–61. – Bibliogr.: 41. – ISSN 2079-0791.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Захарченко Андрій Володимирович – Університет "Україна", Інженерно-технологічний інститут, доцент кафедри автомобільного транспорту; тел.: (097) 380-00-06; e-mail: zav1971@bigmir.net.

Захарченко Андрей Владимирович – Університет "Україна", Інженерно-технологічний інститут, доцент кафедри автомобільного транспорту; тел.: (097) 380-00-06; e-mail: zav1971@bigmir.net.

Zakharchenko Andriy Volodymyrovych – University "Ukraine", Institute of engineering and technology, Associate Professor at the Department of automobile transport; tel.: (097) 380-00-06; e-mail: zav1971@bigmir.net.