



Рисунок 2 – Шестерня с диаметром $d=50$ мм с поверхностной закалкой посредством лазерного луча [5]



Рисунок 3 – Шестерня с диаметром $d=2500$ мм с поверхностной закалкой посредством лазерного луча [5]

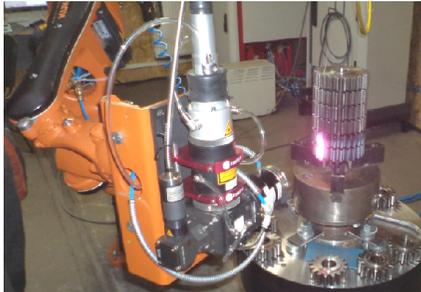


Рисунок 4 – Постепенная закалка зацепления лазерным лучом шириной 40 мм



Рисунок 5 – Наладка манипулятора лазера для закалки следующего слоя

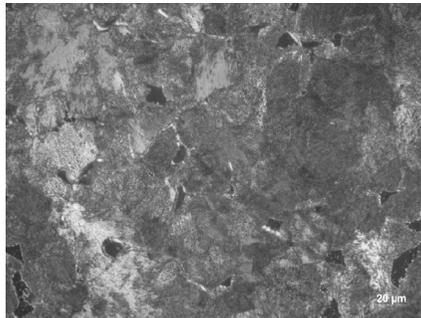


Рисунок 6 – Сталь 12 051, основная структура, Нитал 3%

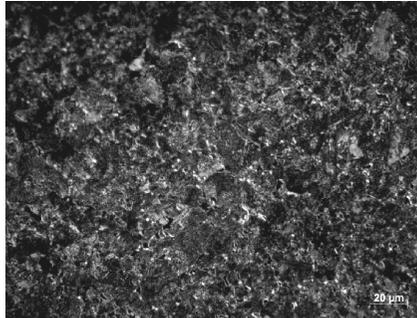


Рисунок 7 – Сталь 12 051, мелкозернистая структура после закалки лазером, Нитал 3%

В случае требования, чтобы зацепление было закаленное по всему контуру с постоянной толщиной, необходимо программой обеспечить движение манипулятора таким образом, чтобы лазерный луч был по возможности перпендикулярен закаливаемой поверхности. На рисунке 8 показан образец зацепления, когда требование постоянной ширины закалки боковой поверхности зуба не выполнено. Это зависит от настройки манипулятора. Чтобы такие ошибки при закалке шестерен не появлялись, необходимо процесс закалки обеспечить программой таким образом, чтобы выполнялось требование постоянной толщины закаленного слоя.

В зубчатых передачах без реверса возможна закалка только одной стороны зуба, при этом обеспечивается отсутствие изменений формы из-за термической обработки – рисунок 9.

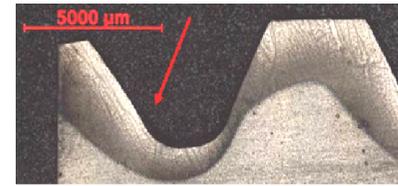


Рисунок 8 – Закаленное зубчатое зацепление с непостоянной толщиной: фото компании MATEX PM

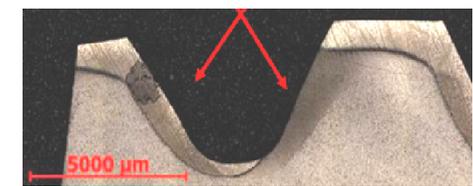


Рисунок 9 – Одностороннее закаленное зубчатое зацепление: фото компании MATEX PM

Заключение. Результаты выполнения диссертационной работы "Определение качественных и количественных характеристик депонированных покрытий в систему "покрытие – боковая поверхность зуба" с трибологической точки зрения подтверждают, что метод обеспечения поверхностной твердости боковой поверхности зуба лазерным методом с точки зрения возможностей применения твердых тонких покрытий является очень перспективным.

Эта технология закалки кажется очень перспективной, прежде всего для маленьких шестерен, поскольку у них также необходимо выполнить необходимые трибологические требования для применения твердых тонких покрытий.

Практические испытания доказали, что все исследуемые технологические параметры лазерной закалки (твердость, износостойкость, гомогенность поверхности, термическое воздействие на окружающую среду) дают лучшие качественные параметры, чем у стандартных методов термической обработки.

Список литературы: 1. Němeček, S. Tribotechnika, 2-2011, str.34-36. 2. Maršálek, P. Únavové zkoušky ozubených kol, [Dizertační práce]. VŠB Ostrava, 2013. 3. Němeček, S., Mužík, T. Tribotechnika, 1-2012, str.14-15. 4. Building, D. Tribotechnika, 2-2012, str.52-53. 5. [15.03.2014], <http://www.matexpm.com/cz/>. 6. Kadnár, M., Rusnák, J. Ecological oils applied in sliding journals. Monograph. Faculty of Engineering, Slovak University of Agriculture in Nitra, 2008, 87p. ISBN 978-80-8069-998-7. 7. Krantz, T., L., et al. Increased Surface Fatigue Lives of Spur Gears by Application of a Coating. NASA/TM-2003-212463 (ARL-TR-2971), 2003. 8. Mao, K., Sun, Y., Bell, T. An initial approach to the link of multi-layer coatings contact stresses and the surface engineered gears, In Surface & Coatings Technology 201(2007) 5796–5803. 9. Šumichrast, J., Rusnák, J., Benda, I., Kadnár, M. Biodegradable oils and their usage. In: New trends in design and technical documentation creation 2006. Proceedings of scientific publications, pp.136-140. ISBN 80-8069-701-9. 10. Tököly, P. Stanovenie hrúbky vrstvy povrchovej časti boku zuba z hľadiska odolnosti voči opotrebeniu, Dizertačná práca, Slovenská technická univerzita v Bratislave – Strojnícka fakulta, 2009, 92s., Bratislava, 2009. 11. Tököly, P., Bošanský, M., Vanya, A. The effect of gear geometry on the thickness of tooth face hardened layer. Visnik Nacional'noho Techničnoho Univerzitetu No.27. S.10-19. ISSN 2079-0791.

Поступила (received) 16.03.2014

УДК 620.178.16 : 621.892

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

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА ТОНКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ, ОБРАЗУЕМЫХ ПРИСАДКАМИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТРЕНИЯ

На основании современных трибологических источников предлагается аналитический обзор путей решения проблемы выбора по механическим свойствам тонких поверхностных слоев трибосопряжений определённого смазочного материала, который соответствует конкретным условиям эксплуатации. Систематизированы требования для нахождения пороговых значений результата совместного действия тепловых и механических нагрузок

© А.В. Захарченко, 2014

зок, 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. Надёжность и долговечность машин обусловлена сохранением во времени объёмной и поверхностной прочности материалов при действии нагрузок и среды. Процессы объёмного разрушения протекают в результате накопления в объёме материала дефектов его структуры, приводящих к акту макроскопического разрушения детали или конструкции. Процессы поверхностного разрушения состоят из большого количества микроскопических актов разрушения, проявляющихся в постепенном уменьшении объёма материала – износе. Это принципиальное различие объёмного и поверхностного разрушения позволяет выделить поверхностную прочность как самостоятельную проблему, имеющую большое практическое значение [1]. Необходимы дальнейшие исследования для уточнения знаний о тонкой структуре поверхностных слоёв материала, формирующейся в процессе трения [2]. В настоящее время многочисленными экспериментальными и теоретическими исследованиями установлено, что процессы накопления повреждений в материале и его последующего разрушения носят иерархический характер, допускающий наличие большого числа масштабных уровней [3-5]. Также общепризнана необходимость проведения исследований не только состава и строения, но и механических свойств плёнок, образуемых присадками на поверхности трения (ПвТ) и эффективно снижающих трение и изнашивание [6].

Для описания явлений, происходящих на ПвТ, и поверхностной деформации используется установившаяся терминология [7]. Терминология оценки результатов изнашивания является очень наглядной при описании внешнего вида изношенных поверхностей и служит своего рода признаком возможных механизмов изнашивания [8].

Постановка проблемы. Износостойкость металлов и сплавов связана со свойствами вторичных структур (ВС), образующихся на ПвТ в процессе изнашивания и взаимодействия с окружающей средой, т.е. с их прочностью, хрупкостью, твёрдостью и прочностью сцепления оксидной плёнки с основной [9]. Прочность ВС – $\sigma_{ВС}$ в результате синергетических процессов при кинетическом фазовом переходе (КФП) по сравнению с прочностью основного материала – $\sigma_{ОМ}$ изменяется в K_y раз: $\sigma_{ВС} = K_y \times \sigma_{ОМ}$.

Коэффициент K_y характеризует эффект эксплуатационного упрочнения (разупрочнения) трибоматериалов. Он определяет качество ВС и самоорганизацию материалов трибосистемы. Фундаментальные положения теории самоорганизации, раскрытие механизмов КФП и разработка комплекса энергетических, кинетических и структурно-прочностных условий самоорганизации материалов трибосистем позволили с единых методологических позиций о закономерностях эволюции структурного и фазового состояния ПвТ решить задачи построения классификации и общей закономерности трения и износа, представить обоснованную систему управления износом [10]. К основным наиболее доступным и экономичным средствам увеличения K_y относятся методы химической модификации – изменения элементного состава ВС. Роль естественного химического модификатора выполняет кислород воздуха или растворённый в смазочном материале. Широкие возможности химического модифицирования ВС реализуются с помощью многих других элементов, добавляемых в смазочные композиции и их сочетаний (S, P, Cl, N, C и др.) [11]. И интенсивность образования, и механическая прочность твёрдых плёнок может в широком диапазоне регулироваться введением разного типа присадок [12]. Существенное влияние на K_y оказывают процессы приработки (режим, среды, покрытия), специальное легирование трибоматериалов,

температура зоны трения. K_y по данным специальных методов физического анализа в зависимости от уровня самоорганизации находится в пределах 1,5-12 [11].

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 оценки микромеханических характеристик поверхностных слоёв и их структурного состояния в зависимости от состава смазочных сред крайне бедна. ВС представляют тонкоплёночный объект ($h_{ВС} = 2,10 \dots 8,10$ нм), образующийся путём КФП, основой которого является совместное действие деформации, нагрева, диффузии и химических реакций. Главным фактором, определяющим неизбежность и механизмы КФП, энергетику активирования, кинетику образования и разрушения ВС, является работа трения А [11].

Известно два основных типа ВС (SS I и SS II) и несколько их разновидностей (SS IA, SS IB, SS IIA, SS IIB). Общими для ВС обоих основных типов является их высокая прочность, способность минимизировать разрушение поверхностного слоя (ПС) и предотвращать повреждаемость. Вместе с тем наблюдаются существенные отличия в строении, химическом и фазовом составе, прочности и адсорбционных характеристиках ПвТ, покрытых плёнками ВС I и II типа в таблице, которые играют решающую роль при достижении состояний антифрикционности и фрикционности [13].

Таблица – Внешние признаки вторичных структур [13]

Тип вторичных структур	Фазовый состав	Общая характеристика состояния поверхностей трения		
		на макроскопическом уровне	на микроскопическом уровне	на субмикроскопическом уровне
I	Твёрдые растворы окислителей в металлах	Блестящая	Блестящая, покрывающая стекловидной плёнкой	Гомогенная (сплошная плёнка без ощутимых признаков субмикрорельефа)
II	Химические соединения нестехиометрического состава	Матовая	Покрывается плёнками различной окраски	Гетерогенная (выглаженные участки, покрытые плёнкой, и участки с разрушившейся плёнкой)

Толщина ВС I типа $h_{ВСI}$ находится в пределах 2,10-4,10 нм, содержание реагента 4-10% (для сплавов на основе железа) [1, 14]. $h_{ВСII}$ II типа находится в пределах 4,10-8,10 нм, содержание реагента – 10-28% (для сплавов на основе железа) [1, 14]. Порядок чередования типов ВС для заданного сочетания материалов и условий среды при увеличении удельной работы трения А, а значит и температуры ПС показан на рисунке 1 [13]. Изменяя химический состав сплавов и смазочных сред, можно смещать критические значения A_{IA} , A_{IIA} , A_{IIB} , A_{IB} и $A_{кр}$ в сторону больших или меньших величин, т.е. управлять образованием того или иного типа ВС.

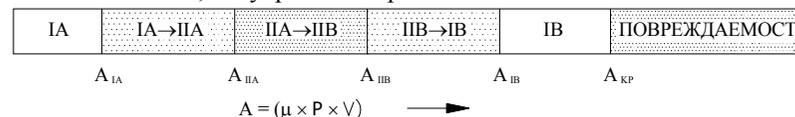


Рисунок 1 – Принципиальная схема формирования вторичных структур I (SSI) и II (SSII) типов при изменении удельной работы трения (А) [13]

Способность смазочного слоя удерживаться на материале ПвТ и разделять их при относительном движении в значительной степени зависит от свойств материала, что было отражено в работах середины 20-го века [15-20]. Структурные особенности ПвТ отражают структуру пограничного трения [21], которая определяется спецификой протекания физико-химических процессов, сопровождающих фрикционное взаимодействие [22]. Влияние металла и химической природы

адсорбированных плёнок на температуру разрушения смазочного слоя было выяснено в опытах Хьюга и Уиттингема [23]. Опыты проводились на приборе Боудена-Лебена [24]. Эти опыты подтверждают, что температура разрушения смазочного слоя в значительной степени зависит от связи металла с прилегающей к нему плёнкой смазки [25]. Химически модифицированные слои должны иметь прочную связь с основным материалом, низкую прочность на срез и высокую термическую стабильность [9]. Процессы химического модифицирования ПвТ особенно эффективны в тех случаях, когда в молекулах присадки содержатся несколько активных элементов и сочетаются функциональные особенности каждого из них. Среди них достаточно высокой противоизносной и противозадирной эффективностью обладают соединения, представляющие собой комбинации хлора и фосфора [26].

Прежде чем приступить к обсуждению возможных причин, вызывающих образование сильновозбуждённого приповерхностного слоя, отметим, что с точки зрения классической механики сплошной среды и теории теплопроводности нет никаких оснований считать, что ПС существует. Действительно, напряжения в стационарной задаче трения однородно распределены по всей толщине образца. Распределение температуры также не имеет никакого другого характерного пространственного масштаба, кроме толщины образца. Представление о том, что внешнее напряжение и температура локализованы в приповерхностном слое, требует иного, отличного от стационарного, подхода к решению задачи контактирования при трении [27]. В работе [28] проведён анализ распространения тепла от поверхности вглубь материала, где для простоты источники тепла, распределённые случайным образом по поверхности и во времени, заменены плоским, излучение которого изменяется во времени периодически. В этом случае динамика температурного поля определяется уравнением теплопроводности

$$T = \alpha \times \Delta T, \quad (1)$$

решение которого представляет собой тепловую волну с волновым вектором $K = (1+i) \times (\omega/2\alpha)^{1/2}$.

Величина обратная мнимой части волнового вектора связана с глубиной проникновения возмущения вглубь материала

$$l_T = (2\alpha/\omega)^{1/2}. \quad (2)$$

Подставляя частоту, которая соответствует режиму трения с образованием и разрывом мостиков сварки, $\omega \sim 10^5 \text{ с}^{-1}$ [29] и значение теплопроводности металлов $\alpha \sim 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ [30] в формулу (2), определим толщину "температурного ПС" $l_T \approx 40 \text{ мкм}$, которая совпадает с экспериментально наблюдаемой толщиной ПС, сформированного при трении в режиме схватывания [31].

Механическая прочность граничного смазочного слоя не тождественна с её тепловой и температурной стойкостью, однако практически трудно отделима от неё, так как в реальных условиях высоким скоростям скольжения и высоким нагрузкам соответствуют высокие температуры [32, 33]. Зная теплопроводности материалов пары трения, можно оценить порядок величины $T_{\text{п}}$ при трении в режиме схватывания. В этом случае давление на пятне контакта может быть порядка 10^3 - 10^4 МПа [29], а по некоторым данным [34], значительно выше. Оценки показывают, что при скорости $\sim 1 \text{ м/с}$ и толщине температурного слоя 30 мкм максимальное значение температуры на пятне контакта будет 10^2 - 10^3 К . Такая температура достаточна для интенсификации процессов пластической деформации и диффузии. Действительно, приложение внешнего напряжения в условиях циклического температурного воздействия приводит к деформациям, величина которых может быть определена из соотноше-

ния $\varepsilon \approx \gamma \Delta T \sigma / \sigma_0$. При $\gamma \sim 10^{-5} \text{ К}^{-1}$, $\sigma \sim 100 \text{ МПа}$, $\Delta T \sim 100 \text{ К}$, $\sigma_0 \sim 100 \text{ МПа}$ характерная величина относительной деформации за цикл составит всего 10^{-3} . Однако с учётом высокой частоты термоциклирования (до $\sim 10^5 \text{ с}^{-1}$) значительные деформации ($\varepsilon > 1$) накапливаются уже в течении нескольких секунд [27].

Хотя уже ясно, что в граничных условиях присадки образуют защитные ПС посредством описанных выше физико-химических процессов, особенности химических реакций, кинетика образования плёнки и её разрушения ещё находятся в стадии изучения. В определении характеристик присадок помимо свойств смазки, очевидно, нужно учитывать также свойства металлической подложки [35]. Материал, используемый для изготовления рабочих деталей подвижных сопряжений, должен обладать целым комплексом качеств, описанных в развитой М.М. Хрущевым теории антифрикционности [36]. В данном случае наибольший интерес представляют:

- 1) способность материалов образовывать на своей поверхности масляную плёнку, обладающую высокой температурной стойкостью;
- 2) малая склонность к схватыванию при металлическом контакте, периодически возникающем при трении по вершинам отдельных микронеровностей;
- 3) способность реагировать с композицией присадок или продуктами их термического разложения с образованием химически модифицированного слоя, предохраняющего от заедания при экстремальных режимах трения.

Эти качества, во всяком случае, два первых, по мнению автора [37] трудно разделить, и поэтому их обычно изучают в комплексе. Применение смазочного материала имеет два особых последствия [38]:

- 1) замечено, что усталостная долговечность в большой мере зависит от отношения толщины плёнки к шероховатости поверхностей;
- 2) имеются некоторые основания считать, что при использовании масел различного химического состава нельзя пренебрегать химическим влиянием на усталостную долговечность.

Чем выше адсорбционная способность ПвТ, тем больше противозадирная стойкость смазочного материала. А поскольку адсорбционная активность металлов тем выше, чем более неоднородна поверхность, можно предположить, что температурная стойкость испытанных смазочных композиций будет больше при трении сталей, поверхность которых менее однородна [37]. Увеличение адсорбционной активности металлических поверхностей при трении часто оказывает определяющую роль на процессы износа и смазки металлов [39].

Чтобы описать состав реальных поверхностей, Шмальц ещё в 1936г. предложил различать "внутренние ПС", включающие основной материал и механически упрочнённые слои, и "наружные ПС", состоящие из загрязнений, адсорбированных газов и оксидов [40]. Ясно, что фактический состав данной поверхности, структура и толщина различных ПС помимо свойств основного материала зависят также от подготовки поверхности и от окружающей среды [38]. Разделение твёрдого тела на слои является довольно условным. В реальных деталях наблюдается плавное изменение структуры по нормали к ПвТ [41]. Схемы строения ПС при механохимическом изнашивании приведены на рисунке 2 [13].

Применение физических методов для исследования материалов при трении позволило установить различия в их структуре с изменением расстояния от поверхности. В исследованиях Накаджимы (1969) на примере строения сплавов железо-углерод рентгенографически идентифицировано наличие при трении трёх слоёв. Первый слой однородно максимально деформирован; во втором деформация убывает с глубиной от поверхности и третий – недеформированный

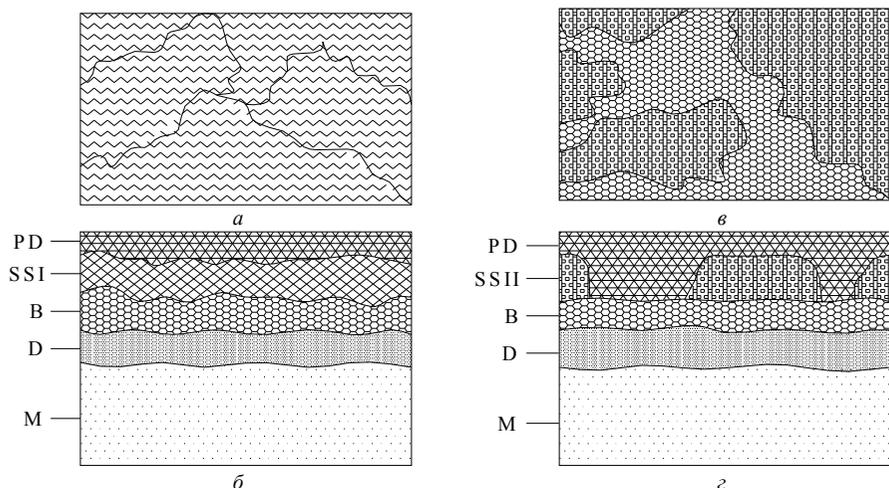


Рисунок 2 – Схема строения поверхности (а, б) и поверхностных слоев (б, з) при изнашивании с образованием вторичных структур I (SSI) и II (SSII) типов: PD – слой продуктов деструкции смазочного материала; SSI, SSII – вторичные структуры соответственно I и II типа; B – слой вторично закалённого карбидизированного металла; D – слой подповерхностной пластической деформации; M – основной металл [13]

металл. Интересно отметить, что толщина первого слоя практически не зависит от содержания углерода и составляет примерно 20 мкм, а толщина второго увеличивается с уменьшением твёрдости от 10 до 100 мкм. Основным критерием, по которому разделялись ПС металла, была величина пластической деформации. Несколько иначе проведено разделение ПС Б. И. Костецким (1973), где в качестве критерия разделения использовали напряжённо-деформированные состояния. Были определены три зоны: 1 – упругоэластическая деформация; 2 – упругая деформация и 3 – основной металл. В то же время на основании рентгеновских и микроскопических данных определены пять основных зон: 1 – высокодисперсный поверхностный максимально деформированный слой; 2 – текстурированный слой; 3 – мелкозернистый хаотически ориентированный слой; 4 – переходной слой с начальными признаками пластической деформации и 5 – недеформированный металл. Несмотря на то что на схеме, все слои отделены друг от друга, полученные результаты исследований, не позволяют однозначно доказать образование плавных или ступенчатых переходов от одного слоя к другому [42].

Характер распределения элементов в ПС стальной детали, работавшей в условиях нормального изнашивания с образованием на ПвТ ВС II типа (SSII) показан на рисунке 3 [13]. Данная структура, состоящая из мелкодисперсных фрагментов материала образца (0,01-0,10 мкм) [32] с отдельными включениями материала контртела, в конечном счёте не зависит от её исходного состояния и соответствует предельно возможному деформированному состоянию. Кроме того, структура фрагментированного слоя характеризуется наличием сильных азимутальных разориентировок, которые достигают нескольких десятков градусов. Изучение механизмов формирования такой структуры представляется интересным, поскольку оно должно способствовать пониманию триботехнических свойств материала в целом. Подчеркнём, что образование фрагментированной структуры с размером составляющих порядка 0,01-0,10 мкм свойственно не только трению, оно имеет место при всех видах пластической деформации, будь то

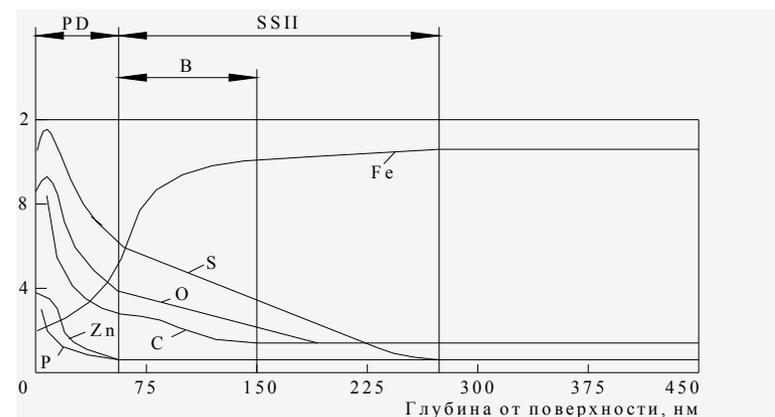


Рисунок 3 – Распределение элементов по глубине от поверхности трения, покрытой плёнками вторичных структур II типа (SSII):

PD – слой продуктов деструкции смазочного материала; SSII – вторичные структуры II типа; B – слой вторично закалённого карбидизированного металла [13]

прокатка [43], деформация по схеме "давление + сдвиг" в камере Бриджмена [44] или активная одноосная деформация [45]. Дальнейшая пластическая деформация не приводит к ещё большему измельчению субструктуры, что позволяет говорить о существовании характерного параметра, определяющего минимально возможный размер фрагментов. Как было показано в работе [46], этот параметр является фундаментальной характеристикой материала, определяемой только постоянной кристаллической решётки, модулем сдвига и т.н. напряжением трения недислокационной природы [47], т.е. напряжением, которое необходимо создать в идеальном кристалле для того, чтобы начать движение прямолинейной дислокации.

При ужесточении температурных условий трения в ПС стальных деталей диффундируют также атомы углерода, формируя карбидизированные вторично закалённые слои (B). Отсутствие или наличие слоёв B является основным отличием между ВС (SS) IA и IB, а также между ПА и ПВ. В зависимости от условий трения глубина залегания слоя B может быть меньше (в), равной (б) или большей (а) толщины ВС (SS) (рисунок 4) [13].

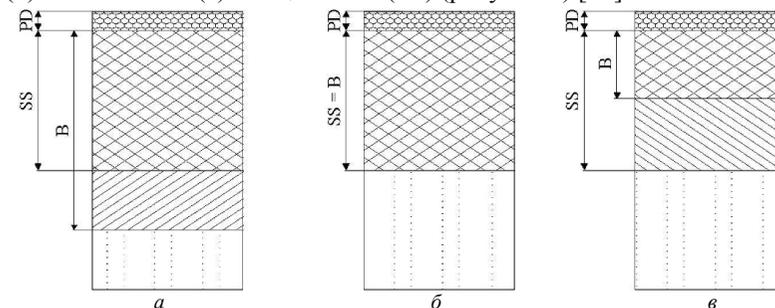


Рисунок 4 – Схема строения поверхностных слоёв при различных толщинах плёнок вторичных структур (SS) и карбидизированных вторично закалённых слоёв (B) [13]

Само по себе наличие или отсутствие слоистой структуры с резкими переходами от одного слоя к другому имеет принципиальное значение для установления механизмов изнашивания. Логично предположить, что существо-

вание ПС, отделённого узкой границей от нижележащих слоёв, приведёт при изнашивании к его отслаиванию в виде пластинчатых частиц износа. Такой механизм аналогичен снятию "корки", защищающей подповерхностные слои.

Образование того или иного строения ПС металла связано с равномерным или ступенчатым изменением структуры с расстоянием от ПвТ. В работах И.И. Гарбара (1974) показано, что в низкоуглеродистой стали при трении формируется ротационная фрагментированная структура. Которая согласно данным работы [48] характеризуется образованием замкнутых микрообластей металла, разориентированных друг относительно друга на углы, достигающие десятков градусов. В дальнейшем образование фрагментов в ПС подтверждено многочисленными исследованиями на различных материалах и в разных условиях трения. Размеры фрагментов ПС зависят от материалов и условий трения и находятся в диапазоне от 3 до 0,3-0,7 мкм. Следует отметить, что глубина фрагментированного слоя, также зависящая от исследуемых материалов и режимов испытаний, во всех случаях больше или равна толщине частиц, образующихся при изнашивании. При этом сами частицы также имеют фрагментированную структуру, а их формирование, обусловлено фрагментацией. Следовательно, разрушение металла, приводящее к образованию таких частиц, происходит внутри фрагментированного слоя. Поэтому его строение и свойства определяют кинетику и механизмы изнашивания при трении.

Вместе с тем в настоящее время не существует единого мнения относительно природы фрагментации при трении, которая связывается с изменением напряжённого состояния и соответствующей пластической деформацией по глубине от поверхности или с явлением фрикционного переноса контактирующих материалов. Аналогичным образом противоречивы данные относительно строения ПС. В ряде исследований показано, что степень фрагментации монотонно уменьшается с расстоянием от поверхности. Согласно другим данным, полученным по аналогичным методикам, ПС имеет ступенчатое строение, при котором верхняя его часть толщиной 1-2 мкм, названная авторами слоем переноса, состоит из дисперсных фрагментов, резко отличающихся по размерам от фрагментов нижележащего слоя. Между этими двумя слоями наблюдается выраженная граница. Согласно данным исследований, в зависимости от материалов и условий трения может наблюдаться как монотонное, так и ступенчатое [49] строение ПС.

Анализ полученных авторами [42] данных позволил им представить структуру и строение деформированного трением слоя металла в виде двух моделей, приведённых на рисунке 5. При построении моделей использовалось приближение "кирпичной кладки", где каждый "кирпич" соответствует отдельному фрагменту. Штриховка на рисунке 5, а, в схематически показывает разориентировку фрагментов.

Как показано в динамической теории кристаллических сред с дислокациями, развитой в работах [44, 50, 51], при ударном воздействии на кристаллическую среду в ней наряду с известными типами волн инициируется сильно диссипативная волна пластических поворотов, затухающих в тонком ПС. Это должно приводить к возникновению вблизи поверхности слоя с сильными кристаллографическими разориентировками, а, следовательно, и с высокой плотностью дислокаций. Такие слои с высокой дислокационной плотностью действительно наблюдаются в экспериментах по ударному воздействию [52]. Высокую плотность дислокаций на ПвТ также наблюдали при трении авторы [27], однако образование дислокаций, по их мнению, обязательно как динамическим, так и статическим воздействиям, которые в первом приближении аддитивны. Наличие диссипативной структуры подтверждается проявление

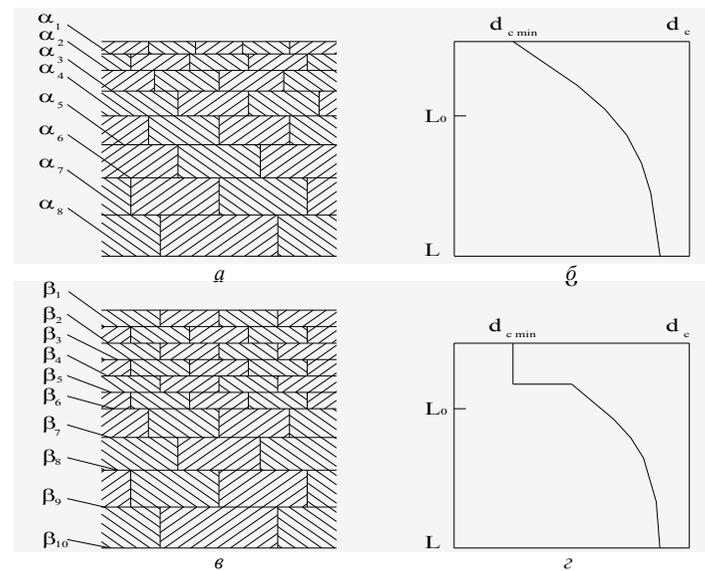


Рисунок 5 – Модели строения поверхностного слоя металла при трении: а, в – схематическое изображение (а – монотонно изменяющейся, в – ступенчато изменяющейся структуры); б, г – соответствующее изменение размеров фрагментов с расстоянием от поверхности [42]

нием флуктуаций f . На рисунке 6 видно, что в случае диссипативной структуры флуктуация от внезапного приложения нагрузки затухает от меньших значений коэффициента к большим, а в случае граничного трения наоборот [53].

Повышение качества машин и, в частности, эксплуатационных показателей их деталей в значительной степени определяется параметрами состояния ПС. Было установлено [54-56], что наряду с традиционными параметрами ПС, с помощью которых оценивают состояние ответственных поверхностей деталей: шероховатость, наклёп и остаточные напряжения, основное влияние на их эксплуатационные показатели в большинстве случаев оказывают такие мало изученные параметры как размер зерна, плотность дислокаций и поверхностная энергия. Многочисленными исследованиями установлено, что в процессе механической обработки деформационные и температурные факторы изменяют физические свойства ПС металла [57].

Кроме размера зерна, значительное влияние на напряжение пластической деформации оказывает плотность дислокаций ρ . Известно соотношение Д. Тейлора [58] $\rho = (Gb/2\pi) \times \epsilon^{1/2}$, где G – модуль сдвига, b – вектор Бюргерса. В деформируемом ПС ρ можно также определить через характеристики материала и напряжение: $\rho = (2\pi\sigma/Gb)^2$.

Очевидно, что до разрушения поликристаллического материала или, другими словами, до достижения определённого критического значения ρ , эти дефекты в ПС накапливаются на протяжении трёх стадий [59]: 1 – металлургическо-термической, 2 – технологической и 3 – эксплуата-

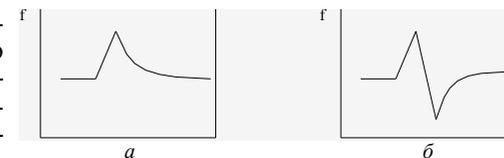


Рисунок 6 – Характер затухания флуктуаций при граничном трении (а), при трении с диссипативной структурой в плёнке (б) [53]

ционной. Это можно представить в виде соотношения [60] $\rho = \rho_{MT} + \rho_{ТХ} + \rho_{Э}$.

Ранее в работах И.И. Гарбара показано, что формирование фрагментированной структуры в ПС металла при трении является следствием увеличения ρ по мере приближения к поверхности. Вместе с тем из многочисленных исследований известно, что распределение действующих напряжений при трении таково, что в зависимости от условий трения максимум напряжений находится на некотором расстоянии от поверхности и только при f порядка 0,4 выходит на поверхность. Тем не менее при ρ , превышающих 10^{10} см^2 (а именно такие ρ , согласно данным работ И.И. Гарбара, наблюдаются в ПС металла при трении), максимальная пластическая деформация должна наблюдаться на поверхности. Это обусловлено действием сил изображения вблизи свободной поверхности, в результате которых при одинаковом уровне внешних напряжений на дислокационном источнике в ПС и внутри твёрдого тела деформация начинается с поверхности. Согласно данным работы [42], максимальная деформация поверхности может наблюдаться даже в том случае, когда величина внешних напряжений в ПС ниже, чем внутри материала. Это объясняет образование структуры с монотонно убывающей по глубине фрагментацией ПС.

Представляется, что наиболее вероятным объяснением ступенчато изменяющегося строения деформированного трением слоя металла являются процессы пластического течения ПС при износе течением (flow wear). Следует отметить, что ряд авторов относят износ течением и соответствующий ему механизм к граничному трению, а другие авторы образование "слоя переноса" наблюдали в основном при трении без смазки. Однако, как показывают третьи авторы, при трении без смазки также образуются гребни износа. Механизм их формирования аналогичен наблюдаемому ранее [42, 43] механизму течения ПС металла при трении со смазкой.

Известно, что напряжения на микроконтактах превосходят номинальные примерно на 2-3 порядка [61]. При таких высоких напряжениях ПС ведёт себя как вязкая жидкость с некоторым эффективным коэффициентом динамической вязкости [27]. Это приводит к образованию максимально деформированного ПС, который и формирует в дальнейшем пластинчатые частицы износа толщиной порядка одного или нескольких микрометров. Образование такого слоя может сопровождаться пересыщением активированного при трении металла кислородом, элементами контртела или смазки [62] благодаря их диффузии в процессе трения. Однако само по себе явление фрикционного переноса при этом не определяет строение ПС.

В силу многочисленных факторов, влияющих на состояние ПС и связанных с комплексом случайных механо-физико-химических процессов, которые протекают при работе трибосистемы, такие связи носят вероятностный характер. На этой основе разработан и постоянно развивается трибоспектральный метод, позволивший синтезировать алгоритм оценки видов изнашивания на основании измерения деформационно-спектральных характеристик. Авторами работы [63] предлагается алгоритм решения обратной задачи трения и износа [64]: определение вида изнашивания по динамическим характеристикам трения.

Для оценки структурного состояния ПС и их однородности В. В. Запорожцем разработан деформационно-спектральный (трибоспектральный) метод микромеханических испытаний [65, 66]. Физическая основа метода – зависимость параметров трения от ориентации отдельных кристаллитов и параметров тонкой кристаллической структуры (анизотропия трения) [1]. Аналитической основой трибоспектрального метода является теория случайных процессов [67].

В целом, трибоспектральный метод основан на определении статистических связей между сопротивлениями локальных микрообъёмов материала контактному

деформированию, создаваемому силовым воздействием [68-70] при сканировании ПС алмазным индентором [71]. В качестве материала индентора используется алмаз, обладающий минимальной адгезией к большинству технических материалов [72].

Выводы. Таким образом, можно считать, что пластическое течение ПС при трении обязано зернограничному проскальзыванию элементов, составляющих фрагментированную структуру. Однако полученную величину коэффициента вязкости нельзя отнести к характеристикам всего деформированного слоя. Данный коэффициент отражает рассеяние подводимой энергии лишь на нижнем мезоскопическом уровне, который характеризуется движением фрагментов субструктуры в локализованной области, соответствующей пятну контакта. На самом деле должен существовать спектр эффективных вязкостей, который зависит от иерархии диссипативных структур в зоне трения. Установление такой иерархии позволит учесть специфику деформирования при трении. Согласно этому механизму, в результате контакта микронеровностей происходит их течение и накопление пластической деформации.

Необходима разработка физически адекватных моделей развития диссипативных структур в поверхностных слоях материалов при их трении и изнашивании. Необходимо продолжить работы в области теории трения при контакте со смазкой, основывающиеся на различных моделях смазочного действия и пригодные для описания процессов трения на нано- и мезоскопическом структурных уровнях.

Список литературы: 1. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов и др.; Под общ. ред. д-ра техн. наук Б.И. Костецкого. – К.: Техника, 1976. – 296с. 2. Современная трибология: Итоги и перспективы / Э.Д. Браун, И.А. Буяновский, Н.А. Воронин и др. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 480с. 3. Панин В.Е., Лыхачёв В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твёрдых тел. – Новосибирск: Наука, 1985. – 230с. 4. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 224с. 5. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / Под ред. В.Е. Панина. – Новосибирск: Наука, 1995. – Т.1. – 298с. – Т.2. – 320с. 6. Заславский Ю.С. Трибология смазочных материалов. – М.: Химия, 1991. – 240с. 7. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), Glossary of Terms and Definitions in the Field of Friction, Wear and Lubrication (Tribology), 1969с. 8. Jahanmir S. On the wear mechanisms and the wear equation // Fundamentals of Tribology: proceedings of the International Conference on the Fundamentals of Tribology, 1978. – P.455-467. 9. Трение и износ в экстремальных условиях: Справочник / Ю.Н. Дроздов, В.Г. Павлов, В.Н. Гучков. – М.: Машиностроение, 1986. – 224с. 10. Костецкий Б.И. Классификация видов поверхностного разрушения и общая закономерность трения и изнашивания // Вестник машиностроения. – 1984. – №11. – С. 10-13. 11. 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. 12. Райко М.В. Смазка зубчатых передач. – К.: Техніка, 1970. – 196с. 13. Караулов А.К., Худолый Н.Н. Автомобильные масла. Моторные и трансмиссионные. Ассортимент и применение. – К.: Журнал "Радуга", 2000. – 436с. 14. Костецкая Н.Б. Механизмы структурной приспособляемости и управление изнашиванием машин. – К.: Наукова думка, 1985. – 236с. 15. Claiton D. The influence of various lubricants on the seizure characteristics of hard steel and bronze // Engineering. – 1940. – Vol. 179, №3865. – P.131. 16. Boerlage G.D., Block H. Four-ball top for testing the boundary lubricating properties of oils under High mean pressure // Engineering. – 1937. – Vol.144, №1154. – P.10. 17. Алышиц И.Я. Сравнительная оценка влияния трущихся материалов и сорта масла на заедание // Вестник машиностроения. – 1952. – №7. – С.34-36. 18. Bouden F.P., Gregory J.N., Tabor D. Lubrication of metal surfaces by fatty acids // Nature. – 1945. – Vol.156, №3952. – P.97. 19. Bouden F.P., Tabor D. The Friction and Lubrication of Solids. – London, 1950. 20. Tabor D. Desorption or "surface melting" of lubricant films // Nature. – 1941. – Vol.147, №3733. – P.609. 21. Alexeyev N.M., Kuzmin N.N., Trankovskaya G.R., Shuvalova E.A. On the similarity of friction and wear processes at different scale levels // Wear. – 1992. – Vol.156. – P.251-261. 22. 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. 23. Huges T.P., Wittingam G. The influence of surface films on the dry lubricated sliding of metals // Trans. Faraday Soc. – 1942. – Vol.38, pt.1. – P.27. 24. Bouden F.P., Leben L. The nature of sliding and the analysis of friction // Proc. Roy. Soc. – 1939. – Vol.169, №938. – P.371. 25. Матеевский П.М. Температурный метод оценки предельной смазочной способности машинных масел. – М.: АН СССР, 1956. – 144с. 26. Dacre B., Bovington C. The adsorption and desorption of dibenyl disulfide on steel // ASLE Trans. – 1982. – Vol.25, №272. – P.144-150. 27. Попов В.Л., Колубаев А.В. Анализ механизмов формирования поверхностных слоёв при трении // Трение и износ. – 1997. – Т.18, №6. – С.818-826. 28. Колубаев А.В., Попов В.Л., Тарасов С.Ю. Структура и механизм формирования поверхностных слоёв при трении. – Томск, 1993. – 16с. (Препр. / ТФ СО РАН,

№15). **29. Власов В.М., Мельниченко Н.В., Рейзер Е.С.** Диагностика методом акустической эмиссии процессов разрушения мостиков схватывания при трении сталей без смазочного материала // Трение и износ. – 1989. – Т.10, №2. – С.257-261. **30.** Физические величины: Справочник / Под ред. Григорьева И.С., Мейликова Е.З. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 478с. **31. Тарасов С.Ю., Колубаев А.В.** Структура поверхностных слоёв трения сплавов 36НХТЮ // Известия вузов: Физика. – 1991. – №8. – С.9-12. **32. Ахматов А.С.** Молекулярная физика граничного трения. – М.: Физматгиз, 1963. – 472с. **33. Davies C.B.** A review of boundary lubrication // Conf. on Lubrication and Wear. – London, 1957. – P.319. **34. Тушинский Л.И., Потеряев Ю.П.** Проблемы материаловедения в трибологии. – Новосибирск: НЭТИ, 1991. – 176с. **35. Rounds F.G.** Influence of steel composition on additive performance // ASLE Trans. – 1972. – Vol.15. – P.54. **36. Хруцов М.М.** Современные теории антифрикционности // Трение и износ в машинах, вып. VI. – М.: АН СССР, 1956. – С.34-37. **37. Матвеевский Р.М., Буяновский И.А., Лазовская О.В.** Противозадирная стойкость смазочных сред при трении в режиме граничной смазки. – М.: Наука, 1978. – 192с. **38. Чихос Х.** Системный анализ в трибонике: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 352с. **39. Протопопов Б.В.** Исследование внешнего трения в связи с механическими и физическими процессами взаимодействия поверхностей: Автореф. дисс... канд. техн. наук: 05.02.04 / УСХА. – К., 1969. – 29с. **40. Schmaltz G.** Technische Oberflächkunde. – Berlin: Springer, 1936. – 126с. **41. Боданович П.Н., Пруцак В.Я.** Трение и износ в машинах. – Мн.: Выш. шк., 1999. – 374с. **42. Гарбар И.И.** О структуре и строении поверхностных слоёв сопряжённых материалов трущихся пар // Трение и износ. – 1990. – Т.11, №4. – С.581-593. **43. Суховаров В.Ф.** Прерывистое выделение фаз в сплавах. – Новосибирск: Наука, 1983. – 156с. **44. Попов В.Л.** Динамика пластических поворотов в кристаллах // Письма в ЖТФ. – 1993. – Т.19, №14. – С.80-82. **45. Конева Н.А., Козлов Э.В.** Физическая природа стабильности пластической деформации // Известия вузов: Физика. – 1990. – №2. – С.89-106. **46. Колубаев А.В., Попов В.Л., Тарасов С.Ю.** Формирование субструктуры поверхностного слоя при трении // Известия вузов: Физика. – 1997. – №2. – С.89-95. **47. Попов Л.Е., Конева Н.А., Терешко И.В.** Деформационное упрочнение упорядоченных сплавов. – М.: Металлургия, 1997. – 218с. **48. Рыбин В.В.** Большие пластические деформации и разрушения металлов. – М.: Наука, 1986. – 288с. **49. Гарбар И.И.** // Трение и износ. – 1981. – Т.2, №6. – С.1076-1084. **50. Попов В.Л.** Gauge theory of "plastically incompressible" elastic-plastic medium // Int. J. Eng. Sci. – 1992. – Vol.30, №3. – С.329-340. **51. Попов В.Л., Чертова Н.В.** Каллибровочная теория распространения волн в упругопластической среде // Известия вузов: Физика. – 1992. – №4. – С.81-93. **52. Лыков С.В., Итин В.И., Мясца Г.А.** и др. Эволюция волн напряжений, возбуждённых в металлах импульсным электронным пучком // Докл. АН СССР. – 1990. – Т.310, №4. – С.858-861. **53. Поляков А.А.** К вопросу о лабораторных испытаниях материалов узлов трения // Трение и износ. – 1990. – Т.11, №4. – С.668-674. **54. Тотаи А.В.** Технологическое управление усталостной прочностью при лезвийных методах обработки // Известия вузов: Машиностроение. – 1990. – №5. – С.133-136. **55. Тотаи А.В.** Теоретические аспекты управления периодом приработки при трении скольжения // Поверхностный слой, эксплуатационные свойства деталей машин и приборов. – М.: МДНТП, 1991. – С.111-114. **56. Тотаи А.В.** Технологическое обеспечение усталостной прочности деталей машин // Ресурсосберегающая технология машиностроения. – М.: МГААТМ, 1994. – С.161-163. **57. Теория пластической деформации металлов / Под ред. Е.П. Унковой, А.Г. Овчинникова.** – М.: Машиностроение, 1983. – 326с. **58. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д.** Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 288с. **59. Тотаи А.В.** Влияние циклических нагрузжений на плотность дислокаций и эмиссионную активность поверхностей // Тез. докл. Всесоюз. конф. "Структура и прочность материалов в широком диапазоне температур". – Каунас, 1989. – С.108-109. **60. Тотаи А.В.** Технологическое обеспечение физических и эксплуатационных свойств поверхностных слоёв деталей машин // Трение и износ. – 1997. – Т.18, №3. – С.385-394. **61. Шеньков Г.П.** Электрофизические явления и процессы переноса при контактных взаимодействиях твёрдых тел: Дисс... докт. физ.-мат. наук: 01.04.11. – Минск, 1989. – 312с. **62. Саган П.И.** Химические аспекты граничной смазки // Трение и износ. – 1980. – Т.1, №1. – С.45-57. **63. Запорожец В.В., Бердинских В.А., Варюхно В.В.** Выбор критериев и синтез алгоритма оценки видов изнашивания // Трение и износ. – 1988. – Т.9, №6. – С.975-984. **64. Запорожец В.В., Бердинских В.А.** Стохастическое решение обратной задачи трибометрии // Трение и износ. – 1980. – Т.1, №6. – С.976-986. **65. Запорожец В.В.** Трибоспектральные методы оценки поверхностной прочности // Докл. VIII Всесоюзной конференции по физике прочности и пластичности металлов и сплавов. – Куйбышев, 1976. – С.25-38. **66. Бердинских В.А., Запорожец В.В.** и др. Основные принципы и аппаратура для корреляционной оценки поверхностных слоёв деталей машин // Новые физические методы контроля качества продукции. – М.: МДНТП, 1977. – С.94-98. **67. Бендат Дж., Пирсон А.** Измерение и анализ случайных процессов. – М.: Мир, 1974. – 464с. **68. Запорожец В.В., Закиев И.М., Блякович О.М., Захарченко А.В.** Методика та приладне забезпечення для оцінки мікроемеханічних властивостей тонких поверхневих шарів // Пр. Міжнар. наук.-техн. конф. "Надтверді інструментальні матеріали на рубежі тисячоліття: отримання, властивості, застосування". – К.: ІНМ НАН України, 2001. – С.262-263. **69. Запорожец В.В., Блякович О.М., Закиев И.М., Захарченко А.В.** Трибоспектральні критерії оптимізації концентрації пакету приладок у базовій трансмісійній оливі // Пр. Міжнар. наук.-техн. конф. "Авіа-2002". – К.: НАУ, 2002. – Т.1. – С.435-443. **70. Закиев И.М., Варюхно В.В., Захарченко А.В.** Прибор для оценки микромеханических свойств тонких поверхностных слоёв трибосопряжений // Пр. Міжнар. наук.-техн. конф. "Авіа-2002". – К.: НАУ, 2002. – Т.1. – С.435-443. **71. Запорожец В.В.** Динамические характеристики прочности поверхностных слоёв и их оценка // Трение и износ. – 1980. – Т.1, №4. – С.602-609. **72. Склерометрия.** Теория, методика, применение испытаний на твердость царапаньем / Под ред. М.М. Хруцова. – М.: Наука, 1968. – 219с.

Поступила (received) 06.03.2014

УДК 620.169.2.

Н.Н. ИШИН, к.т.н., доц., заместитель директора НТЦ "Карьерная техника" Объединенного института машиностроения НАН Беларуси, Минск;
А.М. ГОМАН, к.т.н., доц., начальник отдела Объединенного института машиностроения НАН Беларуси;
А.С. СКОРОХОДОВ, к.т.н., вед. научный сотрудник Объединенного института машиностроения НАН Беларуси;
С.А. ГАВРИЛОВ, ООО "Гормашсервис", Комсомольск

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СИНХРОННОГО НАКОПЛЕНИЯ ПРИ ВИБРОДИАГНОСТИКЕ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Изложен принцип выделения информационной составляющей вибрационного сигнала при диагностике технического состояния зубчатых передач мобильных машин. Описан алгоритм реализации метода синхронного накопления при обработке данных. Приведены результаты использования метода при вибродиагностике редукторов мотор-колес карьерных самосвалов БелАЗ.

Ключевые слова: зубчатая передача, вибродиагностика, синхронное накопление.

Введение. Актуальность задачи. Для зубчатых передач, представляющих собой механизм, предназначенный для преобразования вращательного движения, вибрационный сигнал, отражающий интенсивность их механических колебаний, содержит периодические компоненты, состоящие из гармоник, кратных частотам вращения валов и зубцовых частот, а также некоторую шумоподобную составляющую. Кроме того, в том же сигнале содержатся составляющие от резонансных частот возбуждения элементов передачи, а для мобильных машин еще и колебания, вызванные неровностями дорожного покрытия, переменными нагрузками в трансмиссии и т.д. В результате этого вибрации на корпусе редуктора, рассматриваемые как диагностический сигнал, имеют плотный дискретный спектр, несущий информацию о всех динамических нагрузках, вызывающих опасные колебания различных элементов машины. И первоначальной целью вибродиагностики состояния зубчатых колес является выделение из общего сигнала тех составляющих, которые несут информацию о техническом состоянии объекта диагностирования.

Анализ литературы. Для выделения полезной составляющей сигнала в первую очередь решаются следующие задачи:

- улучшение соотношения сигнал/помеха для отсеивания колебаний подвески мобильной машины, шумоподобных составляющих и т.д.;
- отсеивание колебаний, вызванных другими элементами машины;
- разделение информации о колебаниях зубчатого привода в целом на составляющие, характеризующие его отдельные элементы.

Одним из методов вибродиагностики, позволяющим одновременно решать для зубчатых передач все три задачи, является синхронная гребенчатая фильтрация, строящаяся по принципу синхронного накопления [1, 2] и ориентированная на выделение характерных вынужденных периодических частотных составляющих гармонического ряда возбужденного диагностируемого узла на фоне собственных колебаний механизма и вынужденных колебаний от других узлов. При этом выделение составляющих гармонического ряда, связанных с кинематикой диагностируемого узла, способствует улучшению отношения сигнал/помеха.