

УДК 620.17:531.44

Э.А. Ткаченко, д-р техн. наук, проф.
Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск
т/ф (056) 374-82-17, e-mail: texmash@ua.fm

РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ОБ ИЗНАШИВАНИИ ОТСЛАИВАНИЕМ В АСПЕКТЕ ТЕОРИИ УСТОЙЧИВОСТИ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛ

В рамках модели кусочно-однородной среды на основе линеаризированной теории устойчивости рассмотрен механизм изнашивания отслаиванием спонтанно формируемых слоистых структур в поверхностных микрообъемах тел трибосопряжения. Представлены достижения в области механики разрушения приповерхностных слоев при сжатии вдоль трещин, формируемых на границе раздела слоистых сред. Сформулирована обобщающая концепция отслаивания в процессе изнашивания.

Ключевые слова: *устойчивость, трещины, вторичные слоистые структуры, деформационно-упрочненные слои, трибосопряжение.*

Введение

Процесс образования частиц износа при трении является одной из важнейших проблем, успешное решение которой дает предпосылку для выяснения механизма разрушения трибоповерхностей и построения расчетной модели [1]. Теория износа отслаиванием рассматривает механическое поведение металлов пар трения с учетом состояния их поверхностей и металлургических характеристик [2]. Постулат теории отслаивания, согласно которому процесс износа определяется образованием и ростом трещин до достижения критической длины, является базовым в моделировании механизма образования отслаивающихся чешуек износа [3]. В результате трения макрогомогенные в исходном состоянии материалы приобретают неоднородность, которую в общем случае можно представить как иерархическую структуру, содержащую тонкий поверхностный слой разрыва скорости и последовательно нижележащие слои вторичных структур и наклепанного материала [4]. Толщина и свойства этих слоев определяются как условиями трения, так и свойствами контактирующих тел подвижного сопряжения. Такие слои, как правило, имеют легко выявляемые границы раздела, которые в силу существенных различий состояния слоев концентрируют скопления дефектов и локализуют внутренние напряжения [5]. В зависимости от условий трения разрушение того или иного слоя является преобладающим. В основе поверхностной прочности лежит универсальное явление структурной приспособляемости материалов при трении [5]. Последнее позволило частично снять вопрос о том, происходит ли отделение частиц в результате однократного взаимодействия между неровностями тел трибосопряжения или этому событию предшествует некоторый латентный период спонтанного формирования вторичных слоистых структур [1].

Дальнейшая разработка количественных методов оценки прочности в значительной мере зависит от достоверности и полноты физических моделей поверхностного разрушения, учитывающих явления образования вторичных структур и их свойства, специфику нагружения и разрушения тонкопленочных объектов и граничные условия.

В случае сжатия приповерхностных слоев трибоматериала возникают вопросы, связанные с характером деформирования материала вблизи трещин и с механизмом разрушения на уровне, учитывающем существование четко выраженной слоистой структуры материалов трибосопряжения. В механике разрушения спонтанно формируемых слоистых структур в подвижном сопряжении возникает широкий круг проблем, связанных с многочисленными механизмами разрушения. Механика разрушения при сжатии рассматривает качественно отличную ситуацию, включающую механизмы разрушения, определяемые явлением потери устойчивости в приповерхностной слоистой структуре. При этом возможны различные постановки задач, связанные с учетом полной или неполной адгезии и других поверхностных явлений на границах раздела слоев, с эволюцией в микроструктуре формируемых слоев вторичных структур и деформационно-упрочненных подповерхностных слоев и рядом других явлений. Теория разрушения слоистого материала при сжатии в направлении простирания слоев получила развитие для модели кусочно-однородной среды, когда для описания устойчивости спонтанно формируемой слоистой иерархической структуры применяется соотношение трехмерной линеаризованной теории упругой устойчивости. Методы и подходы работ [6, 7], позволяют получать результаты механики разрушения при сжатии слоистых структур в трибосопряжении с точностью, которая обычно принята в механике деформируемых тел. В механике пластического разрушения при сжатии, когда учитывается деформирование одного из слоев в пластической области до и при потере устойчивости, применяется обобщенная концепция продолжающегося нагружения, сформулированная для трехмерной линеаризованной теории устойчивости деформируемых тел [8]. Современное состояние проблемы изнашивания отслаиванием можно оценивать как период накопления опытных данных и осмысливанием их в категориях механики разрушения приповерхностных микрообъемов материала в трибосопряжении. Обоснование и обобщение полученных результатов на основе теории поверхностной устойчивости слоистых структур, реализуемых в элементах машин, подтверждают целесообразность дальнейшего развития механики разрушения поверхностей трибоконтакта при рассматриваемом подходе, фиксируя уровень разработки проблемы, достигнутый в начале XXI-го века.

Основное содержание и результаты работы

Вопрос об устойчивости состояния равновесия в зоне трибоконтакта впервые рассмотрен в работах [7, 9] согласно принятой гипотезе, в которой локальная потеря устойчивости сильно напряженных поверхностных и подповерхностных объемов материалов подвижных сопряжений в зоне трибоконтакта может быть начальным этапом процесса разрушения поверхностей трения, особенно при пластических деформациях, в силу существенной концентрации сжимающих напряжений. Достижение напряженно-деформированным состоянием критических значений трактуется как интегральный критерий прочности сильно напряженных участков трибоповерхностей с большими градиентами напряжений.

При изучении деформационных процессов необходимо четкое разделение двух зон упруго-пластической деформации при нормальном трении: контактной и подповерхностной. Контактная зона непосредственно примыкает к поверхности трения и имеет глубину 10^4 - 10^5 нм. Специфика напряженного состояния и структуры контактной зоны является главным фактором, обуславливающим механизмы структурной приспособляемости материалов при трении.

Слои вторичных структур. В процесс образования вторичных структур вовлечены компоненты материалов пар трения и внешней среды. При этом неявно предполагается однозначное соответствие масштабных уровней трибосистемы и геометрических параметров слоев, формируемых на поверхности трения деталей подвижного сопряжения. Физический контакт, формирующийся в результате прямого механического воздействия сопряженных поверхностей, реализуется путем взаимной достройки структуры поверхностей трения. Характер такой достройки проявляется в образовании двух основных типов вторичных структур и большой гаммы их промежуточных состояний [5]. Вторичные структуры I типа, обладающие свойством сверхпластичности, легко перетекают по поверхности трения. Деформация сдвига в подвижном трибосопряжении локализуется в формируемом слое вторичных структур, а нормальное давление передается в нижележащие деформируемые подповерхностные слои по схеме «следящей» поверхностной нагрузки. Характерным механизмом поверхностного разрушения является соскальзывание пластически деформированных пленок при неблагоприятных условиях трибоконтакта. Слабо выраженный субрельеф поверхности трения резко отличается от микрорельефа исходной поверхности, образовавшейся в процессе финишной технологической обработки. Механизм перемещения вторичных структур I типа способствует измельчению структуры, формированию изотропных гомогенных пленок нанотолщин и устранению дефектов типа дислокаций, выход которых на поверхность трения является естественным процессом. Вторичные структуры II типа, представляющие собой химические соединения окислителей с металлами нестехиометрического состава, обладают большой прочностью. Разрушение вторичных структур II типа обусловлено постепенным ростом комплекса несоответствий между вторичными структурами и подповерхностным материалом тел трибосопряжения. На границе раздела возникает сетка дислокаций несоответствия, препятствующая выходу дислокаций на поверхность трения. В основу механизма разрушения слоев вторичных структур II типа положена модель зарождения трещины, базирующаяся на концепции накопления дислокаций перед препятствием. Возможность концентрации напряжений на переднем конце заблокированной полосы скольжения до уровня когезионной прочности является одной из причин изнашивания отслаиванием вторичных структур II типа. Деформация сдвига в подвижном сопряжении при сухом трении локализуется на пятнах фактического контакта, а нормальное давление передается к формируемым подповерхностным слоям по схеме «мертвых» поверхностно распределенных нагрузок. При граничном трении в зоне трибосопряжения локализация деформации сдвига происходит в тонком разделительном слое смазки, а нормальное давление трибоконтакта передается к формируемым подповерхностным слоям по схеме «следящей» поверхностно распределенной нагрузки.

Привлечение концепции усталостного разрушения для раскрытия механизма изнашивания отслаиванием является существенным, но не исчерпывающим в построении физической модели и носит в основном качественное описание явления. Анализ характера силового воздействия показал, что в результате знакопеременного цикла нагружения в приповерхностных объемах материалов пар трения накапливаются повреждения, ослабляющие границу раздела. Усталость с точки зрения масштабов возникновения и развития повреждений – процесс локальный, который влечет за собой изменения в микрообъемах материала. Изучение изменения микронапряжений в тонких поверхностных слоях материала, участвующего в трении, показало циклический по времени характер изменения микронапряжений [5], с увеличением которых растет

суммарный объем зон, охваченных этим процессом. Уменьшение микронапряжений связано с образованием трещин в поверхностном слое. Применительно к условиям отслаивания слоев вторичных структур II типа установлен момент наиболее интенсивного отделения частиц, который характеризуется резким изменением силы трения [1]. Наличие временного соответствия между отделением метастабильных частиц износа и резким скачком силы трения позволяет использовать эти величины в качестве косвенных индикаторов числа циклов разрушения-образования слоев вторичных структур. Так как поверхностный субслой находится в состоянии формирования-разрушения слоев вторичных структур, то такое неравновесное состояние предполагает наличие квазистатической границы раздела с подповерхностным деформационно-упрочняемым слоем.

Время, необходимое для разрушения слоев вторичных структур, в частности окисных пленок, зависит от прочности сцепления их с подповерхностным деформационно-упрочненным слоем и действующих напряжений. В данной ситуации ослабление границы раздела поверхностных слоев, за счет возможного образования и роста микротрещин, может быть причиной разрушения отслаиванием слоистых вторичных структур при значительно меньших величинах сил, действующих в зоне трибоконтакта. Длительность цикла образования и разрушения вторичных структур при конкретных условиях нормального механохимического изнашивания находится в пределах от 1 до 7 минут и изменяется в зависимости от скорости скольжения и нагрузки [5]. При изменении химического состава присадок смазочных материалов продолжительность цикла существования вторичных структур может быть увеличена до 1 часа. Время образования пленки критической толщины несравненно больше времени ее разрушения. Превалирующим в изнашивании отслаиванием слоистых вторичных структур является реализация явления потери поверхностной устойчивости под действием системы сжимающих нагрузок с последующим разрушением и фрагментацией продуктов износа на частицы, величина которых соразмерна половине длины полуволны соответствующей формы потери устойчивости. Вследствие дискретности контакта периодический характер процесса образования и разрушения вторичных структур в реальных условиях трения носит локальный характер. Неоднородность эпюры нагружения на пятнах фактического контакта во времени и по пространственным координатам поверхности трения обуславливает одновременное протекание различных фаз локально периодических процессов. Это приводит к сглаживанию периодичности и динамическому равновесию процессов образования и разрушения вторичных структур, которое имеет место в определенном диапазоне неизменных установившихся значений нагрузок и скоростей.

Деформационно-упрочненные слои. Физические процессы, обуславливающие появление циклов на зависимости деформационного упрочнения подповерхностных слоев при достаточно длительном временном интервале фрикционного нагружения, объясненные в работе [10] с точки зрения дислокационных представлений, подтверждают циклический лепестково-послойный характер разрушения подповерхностных слоев. На микроуровне, из энергетических условий, высказано предположение, что нарушение сплошности материала имеет место в том случае, когда достигается критический уровень упругой энергии деформации, после чего реализуется потеря устойчивости кристаллической решетки. На фоне цикличности, связанной с послойным микроотслаиванием подповерхностного слоя, проявляется вторая цикличность, обусловленная подкачкой упругой энергии в более глубокие слои материала и связанное с этим более интенсивное разрушение деформационно-

упрочненных слоев. В этом случае накопление дефектов подповерхностным слоем и связанное с этим увеличение скрытой энергии деформации на определенной стадии фрикционного взаимодействия понижают уровень активации процессов релаксации. В процессе фрикционного нагружения, обусловленное уменьшением действующих систем скольжения и скоростным деформированием подповерхностного слоя, наблюдается охрупчивание материала и заметное уменьшение локальной деформации, предшествующей разрушению, и напряжения разрушения становятся намного ниже макроскопического предела выносливости. Следовательно, при квазиупорядоченном распределении дислокационных ансамблей нет преимущественных локальных очагов разрушения, и если это происходит при достижении критического уровня упругой

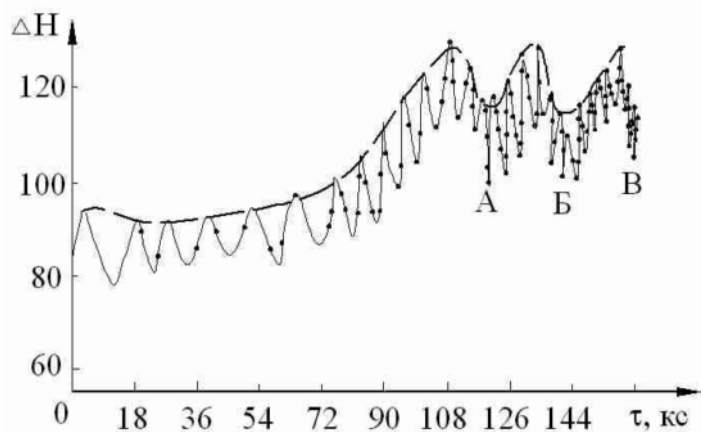


Рис. 1. Цикличность формирования-разрушения слоев вторичных структур и подповерхностных слоев в режиме нормального трения. (ΔH , 10^3 А/м – ширины линии ферромагнитного резонанса; τ – время трения)

энергии, то в отслаивании участвует доминирующая часть материала подповерхностного слоя. В силу потери устойчивости деформационно-упрочненных слоев процессы разрушения локализуются во времени, которое зависит от устойчивости формоизмененной слоистой структуры в новом равновесном состоянии. Однако anomalно лепестковое отслаивание диспергированного приповерхностного слоя происходит путем обвального разрушения на стадии глубоких срывов кривой $\Delta H = f(\tau)$ (рис.1) [10].

Следует отметить, что в рассматриваемом комплексе явлений иерархическая структура приповерхностных слоев формируется под действием системы распределенных сил сжатия и проявляется в том, что возникающие трещины в параллельных плоскостях связаны в основном с эксплуатационными процессами. При сжатии вдоль трещин проведена классификация постановок задач и отдельно выделены классы задач для макротрещин, структурных трещин и микротрещин. Специфика задач механики разрушения при сжатии вдоль трещин, применительно к кусочно-однородным средам заключается в том, что здесь нельзя непосредственно применять классический критерий хрупкого разрушения Гриффитса-Ирвина, так как в рамках линейной механики трещин в рассматриваемой ситуации коэффициенты интенсивности напряжений и раскрытие берегов трещин равны нулю. Поскольку все критерии хрупкого разрушения материалов связаны с коэффициентами интенсивности напряжений или с величинами, характеризующими раскрытие берегов трещины, то применительно к условиям нагружения трибоконтакта общепринятые критерии хрупкого и квазихрупкого разрушения «не работают». Задачи изнашивания отслаиванием, относящиеся к исследованию ситуации, когда трещины находятся вблизи поверхности трения, а именно на границе раздела слоев вторичных структур и деформационно-упрочненных слоев, требуют учета влияния свободной неперекрываемой трибоконтактом поверхности или подкрепленной контртелом в

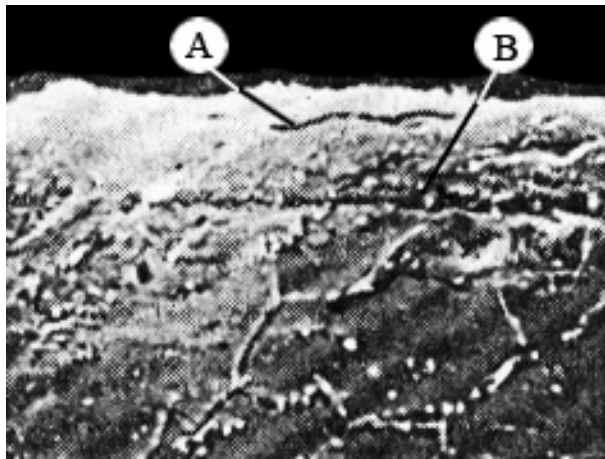
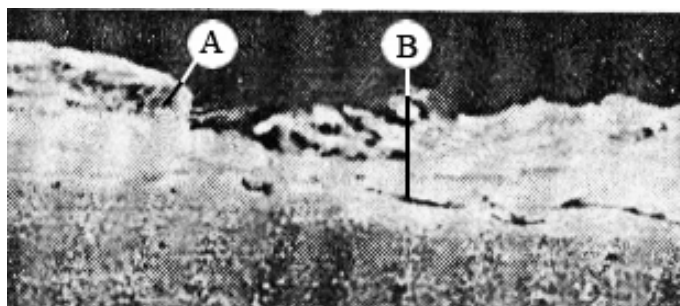


Рис. 2. Потеря устойчивости слоев вторичных структур II типа (A) в процессе формирования деформационно-упрочненного подповерхностного слоя (B)

трещин, может произойти вследствие бифуркации потери устойчивости одного из слоев иерархической структуры.



а)



б)

Рис. 3. Разрушение деформационно-упрочненного слоя, совпадающее с потерей устойчивости состояния равновесия подповерхностных микрообъемов трибоматериала (а). Локальное разрушение деформационно-упрочненного субслоя (A) с пленкой вторичных структур вследствие потери устойчивости подповерхностного слоя (B) (б)

трибосопряжении поверхности. В этом случае разрушение слоев вторичных структур II типа совпадает с потерей устойчивости состояния равновесия микрообъемов деформируемого материала и исключается переход слоев вторичных структур в смежное равновесное состояние (рис.2). Когда трещины расположены в нескольких параллельных плоскостях слоистой структуры подповерхностного слоя, включая границу раздела с массивом материала, разрушение отслаиванием, при стесненной деформации вдоль

Реализация рассматриваемого механизма разрушения подповерхностных деформационно-упрочненных слоев при сжатии вдоль трещин возможна по двум схемам, общим для которых является первоначальный этап разрушения, заключающийся в потере устойчивости состояния равновесия сжатой части упрочненного материала возле трещины. Согласно первой схеме разрушение деформационно-упрочненного слоя совпадает с потерей устойчивости подповерхностного слоя (рис.3, а). При второй схеме разрушение происходит в два этапа: 1) потеря устойчивости не совпадает с разрушением подповерхностных слоев, но вызывает разрушение слоев вторичных структур и переходных субслоев (рис.3, б); 2) после потери устойчивости возле трещин подповерхностный пакет слоев переходит в смежное равновесное состояние и конфигурация трещины изменяется.

Второй этап разрушения связан с развитием трещин начиная от состояния, которое возникло после потери устойчивости. При продолжении нагружения по данной схеме разрушения уже не все коэффициенты интенсивности напряжений будут равны нулю, так как вследствие несимметрии появляются изгибные напряжения и при увеличении длины трещины происходит изменение упругой энергии системы.

Следовательно, на втором этапе разрушения возникает ситуация, которая соответствует применению критерия разрушения Гриффитса - Ирвина [6] при хрупком и квазихрупком разрушениях. Таким образом, при разрушении слоев вторичных структур II типа критические значения сжимающих напряжений, вызывающие реализацию явления потери поверхностной устойчивости состояния равновесия возле трещин, соответствуют значению теоретического предела прочности при сжатии. При разрушении деформационно-упрочненных подповерхностных слоев на первом этапе критические значения сжимающих напряжений соответствуют величине реализации потери устойчивости состояния равновесия возле трещин, а на втором этапе – применению критерия Гриффитса – Ирвина или другого критерия хрупкого или квазихрупкого разрушения по отношению к ситуации, которая возникла после потери устойчивости, т.е. по отношению к смежной равновесной форме. В механике разрушения термин «отслоение», при наличии приповерхностных трещин, соответствует состоянию, которое возникает после потери устойчивости. В связи с этим, разрушение слоев вторичных структур II типа и первый этап разрушения подповерхностных слоев можно трактовать как отслоение при изнашивании в трибосопряжении. Термин «развитие отслоения» соответствует второму этапу разрушения подповерхностных слоев и характеризуется ростом микро- и структурных трещин в магистральную макротрещину.

Итак, при разрушении спонтанно формируемой слоистой структуры в приповерхностных объемах трибоматериалов при сжатии вдоль трещин на первом этапе разрушения возникает задача определения критических значений сжимающих напряжений, соответствующих потере устойчивости состояния равновесия возле трещин, причем при разрушении слоев вторичных структур II типа указанная задача соответствует критерию разрушения. Предложенный в работе [8] критерий разрушения, основанный на использовании линеаризированной теории устойчивости деформируемых тел, эффективен при решении задач износа отслаиванием поверхностей трибосопряжения. Сравнение расчетных данных, полученных при строгой постановке, с результатами экспериментальных исследований подтверждают высокую точность, принятую в механике разрушения применительно к проблемам триботехники.

Модель размерного износа подвижных сопряжений элементов машин

Многоцикловая модель размерного износа включает конкурентный механизм разрушения подповерхностных слоев при одновременном протекании процесса формирования – разрушения слоев вторичных структур. Модель эволюции ограничивающей поверхности слоистой среды в результате циклического изменения геометрических параметров ограничивающей поверхности адекватно описывает окислительный и механический механизмы разрушения поверхностных объемов материала в режимах термосилового нагружения, когда контролирующим механизмом в пределах цикла формирования-разрушения подповерхностного слоя является механизм формирования-разрушения слоев вторичных структур II типа (рис.4).

Кинетика процессов на поверхности контакта при конкурентном изнашивании изложена в форме принципа опережающего действия: стабилизация износа возможна, если время развития циклического процесса формирования-разрушения слоев

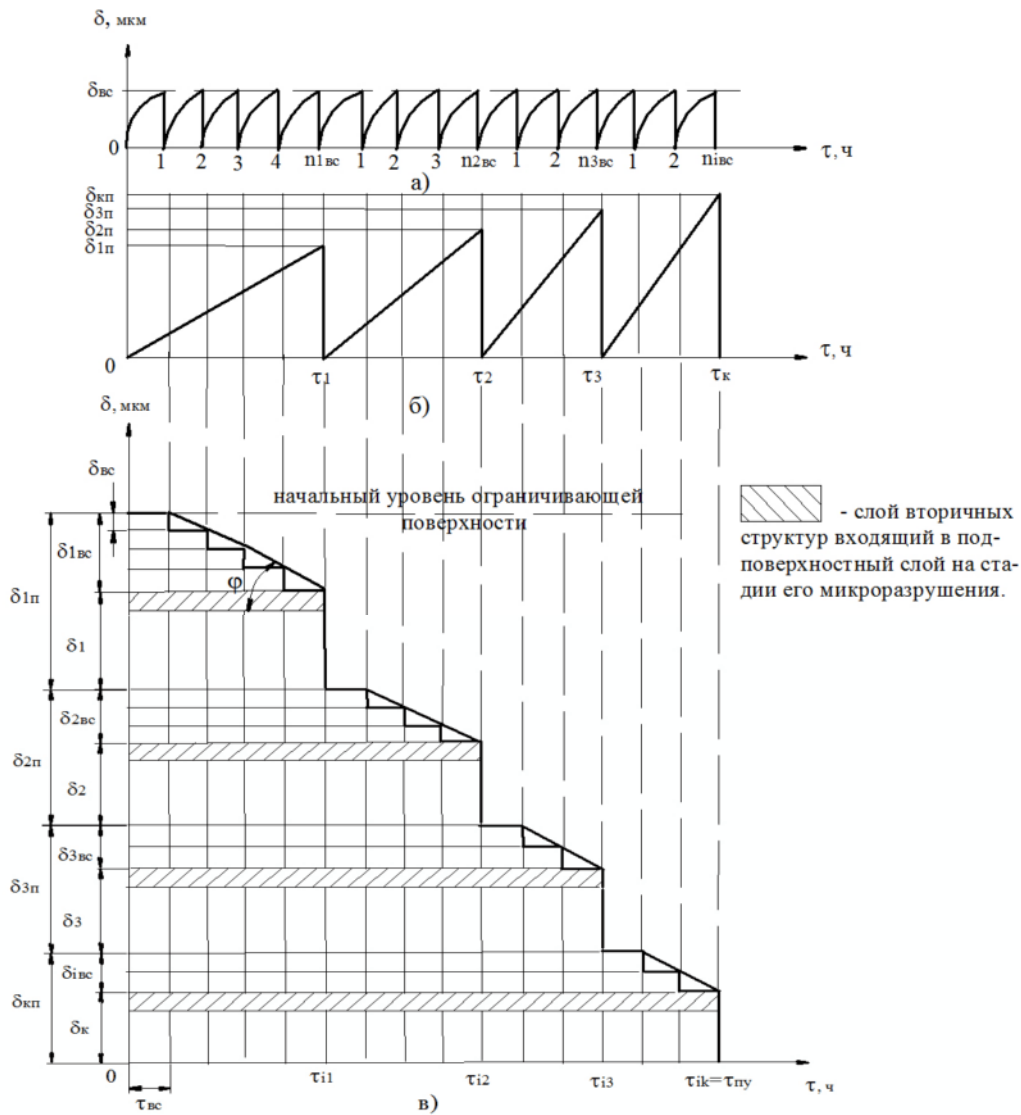


Рис. 4. Модель эволюции геометрических параметров ограничивающей поверхности в условиях конкурентного циклического процесса формирования-разрушения слоев вторичных структур и подповерхностных слоев: а) закон формирования-разрушения слоев вторичных структур; б) закон формирования-разрушения подповерхностных слоев; в) модель эволюции геометрических параметров при опережающем режиме потери поверхностной устойчивости слоев вторичных структур ($n_{\text{ивс}}$ - число циклов формирования-разрушения слоев вторичных структур в k -ом цикле разрушения подповерхностного слоя; $\tau_{\text{вс}}$ - время цикла формирования-разрушения слоя вторичных структур; $\delta_{\text{ивс}}$ - суммарная толщина вторичных структур в k -ом цикле микроразрушения подповерхностного слоя; $\delta_{\text{кп}}$ - толщина сформированного подповерхностного слоя в k -том цикле формирования - разрушения; $\delta_{\text{к}}$ - толщина подповерхностного слоя в момент потери поверхностной устойчивости в k -том цикле формирования-разрушения; $\tau_{\text{к}}$ - время формирования-разрушения подповерхностного слоя в k -том цикле; $\tau_{\text{ик}}$ - время формирования-разрушения $n_{\text{ивс}}$ циклов пленок вторичных структур в k -том цикле формирования-разрушения подповерхностного слоя)

вторичных структур τ_{iBC} опережает момент проявления потери устойчивости подповерхностного деформационно-упрочненного слоя τ_{iK} . Важнейшим условием реализации этого принципа является сохранение качества слоев вторичных структур в интервале нагрузок, скоростей и колебаний параметров внешней среды, при которых сохраняются

стабильные значения градиента температуры, микрогеометрия и допустимый зазор между взаимодействующими поверхностями. Предлагаемый принцип, выраженный коэффициентом опережающего действия $K_{o.d.} = \tau_K / \tau_{BC} \geq 1$, имеет следующие следствия:

- при $K_{o.d.} > 1$ создаются условия, при которых источники формирования подповерхностных слоев накапливаются под влиянием упругопластических деформаций на глубине $\delta_{iBC} + \delta_K$, что приводит к локализации их взаимодействия в микрообъемах подповерхностного слоя в течение времени τ_K и преимущественному изнашиванию путем циклического формирования-разрушения слоев вторичных структур II типа δ_{BC} ;

- при $K_{o.d.} \leq 1$ создаются условия, при которых формирование границы подповерхностного слоя не зависит от процесса образования слоев вторичных структур и препятствует их развитию, что приводит к вырождению процесса изнашивания подповерхностных слоев по механизму циклического микроразрушения слоев вторичных структур II типа.

Модель циклического конкурентного разрушения подповерхностных трансформированных слоев (рис.4) предполагает опережающий режим потери поверхностной устойчивости формируемых слоев вторичных структур II типа в рамках цикла формирования-разрушения подповерхностного деформационно-упрочненного слоя $K_{o.d.} > 1$.

Период стойкости (работоспособности) элемента конструкции при циклическом разрушении слоев вторичных структур и подповерхностных деформационно-упрочненных слоев, определяется величиной допустимого износа

$$I_n = \sum_{i=1}^6 \delta_{iBC} + \sum_{K=1}^n \delta_K.$$

Геометрические параметры слоистой структуры δ_{iBC} и δ_K

являются функцией критических значений параметров нагружения $P_{кр}$ и волнообразования $\omega_{кр}$ в диапазоне кинетики роста толщин эксплуатационного поверхностного слоя. Точное решение конкретной задачи методом бисекции получено в работе [11].

Заключение

В результате обобщения экспериментальных и аналитических исследований в области изнашивания отслаиванием трибоповерхностей элементов машин установлено:

1. Привлечение теории устойчивости деформируемых твердых тел для решения прикладных задач несущей способности приповерхностных объемов материала в зоне трибоконтакта способствует описанию механизма разрушения отслаиванием на качественно новом теоретическом уровне.

2. Дальнейшее развитие теории изнашивания отслаиванием связано с решением отдельных классов задач в рамках линеаризованной теории устойчивости для расчетных схем наиболее полно моделирующих поведение слоистых структур в подвижных сопряжениях элементов машин.

3. Геометрическая интерпретация размерного износа подвижных сопряжений на базе модели циклического разрушения слоев вторичных структур и деформационно-упрочненных подповерхностных слоев является иллюстрацией возможностей

применения фундаментальных достижений теории устойчивости деформируемых тел при решении технологических задач машиностроения, когда параметры критического нагружения и волнообразования определяются с высокой точностью, принятой в механике разрушения.

Список литературы:

1. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов // М.: Машиностроение, 1977. - 526с.
2. Suh N.P. The Delamination Theory of Wear / N.P. Suh. - 1973. - Vol.25. - P. 111-124.
3. Further Investigation the Delamination Theory of Wear. / [N.P. Suh, S. Jahanmir, E.P. Abrahamson, A.P.L. Turner] // ASME, Journal of Lubrication Technology. - 1973. - vol. 95, Nu.4. - P. 114-122.
4. Проблемы изнашивания твердых тел в аспекте механики. / [А.Ю. Ишлинский, И.В. Крагельский, Н.М. Алексеев и др.] // Трение и износ. - 1986. - №4. - С. 581-590.
5. Поверхностная прочность материалов при трении. / [Б.И. Костецкий, Н.Г. Носовский, А.К. Караулов, Л.Н. Бершадский и др.] // Киев: Техніка, 1976. - 296 с.
6. Гузь А.Н. Основы механики разрушения композитов при сжатии: монография: в 2 т. / А.Н. Гузь. - К.: Літера ЛТД, 2008. - Т. 1. - 592 с.
7. Tkachenko E.A. Stability of Tribotechnical Laminated Coatings Subjected to Tracing Loads / E.A. Tkachenko // Int. Appl. Mech. - 1999. - 35, №6. - P. 561-566.
8. Гузь А.Н. Механика разрушения композитных материалов при сжатии / Гузь А.Н. - Киев: Наукова думка, 1989. - 632 с.
9. Tkachenko E.A. Stability of Layered Coatings under Biaxial Thermomechanical Loading / E.A. Tkachenko // Int. Appl. Mech. - 2009. - 45, №12. - P. 1349-1357.
10. Пинчук В.Г. Кинетика упрочнения поверхностного слоя при трении / В.Г. Пинчук // Трение и износ. - 1989. - №3. - С. 401-405.
11. Ткаченко Э.А. Потеря поверхностной устойчивости трансформированных слоев рельсов при обкатке колесными парами подвижного состава / Э.А. Ткаченко // Подъемно-транспортная техника. - 2010. - №4. - С. 94-104.

Надійшла до редакції 23.01.2013.

Е.А. Ткаченко

РОЗВИТОК УЯВЛЕНЬ ПРО ЗНОШУВАННЯ ВІДШАРОВУВАННЯ В АСПЕКТІ ТЕОРІЇ СТІЙКОСТІ ДЕФОРМІВНИХ ТІЛ

В рамках моделі кусково-однорідного середовища на основі лінеаризованої теорії стійкості розглянуто механізм зношування відшаровуванням структур, які спонтанно формуються в поверхневих мікрооб'ємах тіл трібоспряжень. Представлені досягнення в галузі механіки руйнування приповерхневих шарів при стисканні вздовж тріщин, формованих на межі розділу шаруватих середовищ. Сформульована узагальнююча концепція відшаровування в процесі зношування.

Ключові слова: *стійкість, тріщини, вторинні шаруваті структури, деформаційно-зміцнені шари, трібоспряження.*

E.A. Tkachenko

DEVELOPMENT OF IDEAS ABOUT WEAR REMOVING LAYER BY LAYER IN ASPECT OF THEORY OF STABILITY OF THE DEFORMED BODIES

Within the framework of model of piece-homogeneous environment on the basis of linearized theory of stability the mechanism of wear is considered The paper presents the achievement in the area of mechanics of destruction of skin layers at the compression along the cracks formed on the border of division of the stratified environments.

Key words: *stability, cracks, secondary stratified structures, work-hardened layers, tribointerface.*