

*В.Н. Стадниченко, к.т.н., А.П. Стахова, м.н.с.
(Национальный авиационный университет, Украина)*

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРИБОВОСТАНАВЛИВАЮЩИХ СОСТАВОВ

Проведены экспериментальные исследования при трении, которые показали, что скорость роста и толщина МКС зависят от величины нагрузок, приложенных к парам трения.

Введение. В настоящее время достаточно широко распространились технологии по восстановлению ресурса механизмов и машин, которые включают способы обработки трущихся поверхностей без их разборки и прекращения эксплуатации. Наибольшее распространение получили такие составы как “РВС”, “Nanoprotec” Россия и “ХАДО” Украина [1]. Дальнейшим развитием этой технологии является разработка трибовосстанавливающей смеси “Комбат” [2]. Даная технология образования металлокерамического слоя на поверхностях контакта трибосистем включает в себя приготовление восстановительной смеси, ее подачу в зону трения посредством рабочей жидкости (смазочной среды), приработки пары трения. Трибовосстанавливающий (ТВС) состав готовят на основе минеральных веществ, которые содержат оксид кремния в метастабильном состоянии, или их смесей, и катализаторов [2].

Однако до настоящего времени механизм безизносного трения металлокерамического слоя с условием его подвижности в технологиях триботехнического восстановления остается малоизученным. Подобные исследования являются достаточно трудоёмкими [3,4]. Они предполагают разработку специальных методик для определения эксплуатационных характеристик трибосистем с введёнными ТВС в зависимости от условий контактного взаимодействия. При этом временные затраты на проведение подобных исследований достаточно велики. В тоже время, остаётся проблема, связанная с оценкой состояния пар трения, работающих с ТВС, в условиях эксплуатации.

Следует отметить, что для решения данной проблемы всё большее распространение получают новые методы исследований, позволяющие получить информацию о кинетике процессов, протекающих в материалах в условиях их динамического контактного взаимодействия. Одним из таких методов является метод акустической эмиссии (АЭ) [3,4]. Как показывают результаты исследований [1,2,3,4], он обладает высокой чувствительностью к изменению механизмов изнашивания деталей, определяемых физико-химическими процессами, протекающими в поверхностных слоях материалов на границе их раздела. Это даёт возможность использовать АЭ для разработки методов контроля и методов оценки состояния пар трения с определением стадий изнашивания их материалов.

Методика проведения экспериментальных исследований. Для проведения исследований использовались пары трения из стали 12Х2Н4А. МКС на поверхности контакта получили путём введения в редукторное масло Б-3В ТВС “Комбат”, согласно методике, рассмотренной в работе [3]. Выбор материалов исследованных пар трения и смазочной среды обусловлен их широким использованием в трансмиссиях авиационных газотурбинных двигателей ГТД.

Испытания проводились на универсальной машине трения СМТ-1 с использованием конструктивной схемы “диск-диск”. Согласно этой схеме один из образцов делается неподвижным, а другой вращается на шпинделе машины трения. При этом реализовывался режим трения качения с 20% проскальзыванием. Размеры образцов составляли: $D_{обр}=25\text{мм}$, толщина $h=15\text{мм}$. Скорость вращения приводного вала машины трения также выбиралась исходя из максимального приближения к условиям эксплуатации моделируемых узлов трения и составляла 500 об/мин. Для определения максимально возможной нагрузки на

МКС в качестве исходных данных использовали контактные напряжения, полученные при расчете на прочность зубьев вертолётных редукторов, как наиболее нагруженных элементов моделируемых узлов трения. Их значения составляют порядка $\sigma_{\text{макс}}=800-1000$ МПа. В соответствии с этим исследовался диапазон рабочих напряжений до 1000 МПа и варьировался в сторону уменьшения с шагом 100 МПа. Для определения толщины МКС использовалось специальное устройство, которое позволяло осуществлять непрерывное фиксирование изменения размера испытываемых на машине трения СМТ-1 образцов [4].

Одновременно с регистрацией толщины МКС мобильным акусто-эмиссионным комплексом проводилась регистрация и обработка сигналов акустической эмиссии (АЭ). Частотный диапазон регистрируемых сигналов АЭ составлял 500кГц – 1МГц. В качестве основных обрабатываемых параметров сигналов АЭ, использовались: усреднённая амплитуда, усреднённая мощность и усреднённая накапливаемая мощность. Время усреднения составляло 0,2 с.

В процессе проведения эксперимента, после выхода пар трения на “нанозносный” режим эксплуатации проводилась остановка испытаний и выполнялись фрактографические исследования поверхностей образцов, а также Фурье-анализ анизотропии структурного состояния поверхностных слоёв по жёстким фотокопиям, полученным на растровом электронном микроскопе “CamScan-4DV” при увеличении $\times 1960$. Основная методология обработки информации и представления её результатов рассмотрены в работе [5].

Результаты эксперимента. Проведённые исследования показали, что при введении ТВС в процессе трения происходит образование МКС, толщина которого определяется, прежде всего, величиной напряжения контактного взаимодействия (приложенной нагрузки). При этом уровень приложенной нагрузки влияет на скорость роста МКС. Так при $\sigma_{\text{макс}}=1000$ МПа (рис. 1, кривая 1) образование на роликах нового слоя (МКС) регистрировалось уже через 10 мин с момента введения ТВС. После истечения 3 часов испытаний рост покрытия прекращался, достигнув значения 23-25 мкм. При этом, как показали исследования, при постоянной приложенной нагрузке, процесс роста МКС во времени протекает с изменением его скорости.

В начальный период времени работы пар трения (до 45 мин) скорость образования МКС была небольшой и составляла 1,5-2,5 мкм/ч. Затем, в течение 1-2 ч. она увеличилась до максимального значения - 7,5-8,5 мкм/ч, а к концу 3-5 часов испытаний падала вплоть до нуля. Последующие испытания на протяжении пяти часов показали, что наблюдаются незначительные отклонения, как в сторону возрастания, так и в сторону убывания регистрируемой толщины МКС, что свидетельствует о протекании процесса незначительного износа МКС с последующей его регенерацией.

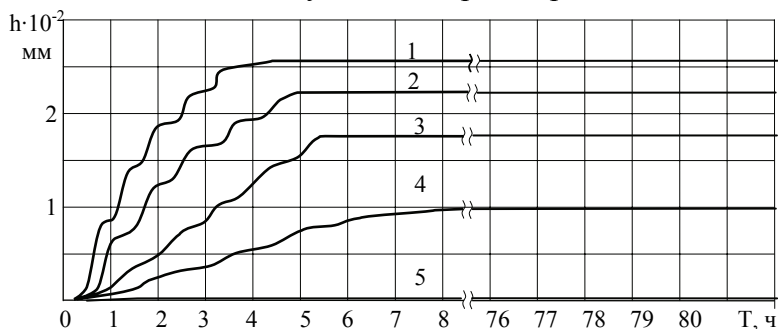


Рис. 1. Скорость образования и толщина МК покрытия в зависимости от контактной нагрузки

1 – $\sigma_{\text{макс}}=1000$ МПа; 2 – $\sigma_{\text{макс}}=900$ МПа; 3 – $\sigma_{\text{макс}}=800$ МПа; 4 – $\sigma_{\text{макс}}=700$ МПа; 5 – $\sigma_{\text{макс}}=600$ МПа

При уменьшении нагрузки, приложенной к парам трения, характер образования и роста МКС являются подобными. Так при нагрузке $\sigma_{\text{макс}}=900$ МПа максимальная толщина образующегося МК слоя составляла $h_{\text{макс}}=20-22$ мкм. Завершение процесса его роста прекращалось приблизительно через 5 часов после введения ТВС (рис. 1, кривая 2). С

дальнейшим снижением нагрузки на пары трения происходило увеличение времени образования МКС при одновременном уменьшении его толщины. Так при 800 МПа образование МКС происходило через 5,5 часов после введения ТВС при толщине образованного МКС в 17-18 мкм (рис. 1, кривая 3). Для нагрузки 700 МПа время образования МКС составляло 7 часов, причём толщина образовавшегося МКС не превышала 10 мкм (рис. 1, кривая 4). При $\sigma_{\text{макс}}=600$ МПа и ниже (рис.1, кривая 5) образование МКС не фиксировалось.

Результаты обработки сигналов АЭ (рис. 2) показали, что не зависимо от значения эксплуатационной нагрузки в процессе трения образцов в течение первых 8 часов происходит увеличение значения усреднённой и суммарной мощности сигналов АЭ.

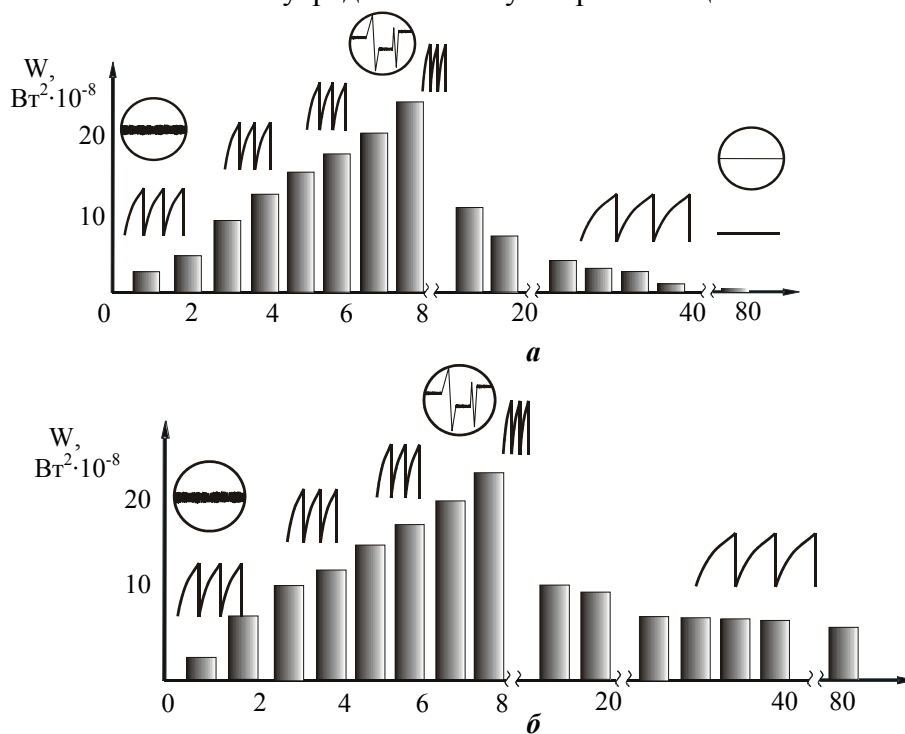


Рис. 2 Характер изменения усреднённой и суммарной мощности W сигналов АЭ

$a - \sigma_{\text{макс}}=1000$ МПа; $б - \sigma_{\text{макс}}=700$ МПа

При этом уровень суммарной мощности приблизительно одинаков и достигает значения порядка $W \approx 25 \times 10^{-8} \text{B}^2$ (рис. 2, $a, б$). При дальнейшей работе пар трения (более 8 часов) наблюдается постепенное падение как усредненной, так и суммарной мощности сигналов АЭ, причём с увеличением времени испытаний при уменьшении приложенной к образцам нагрузки “остаточный” уровень значений данных параметров увеличивается (рис. 2, $a, б$, участок 2).

Полученные результаты также показали, что через 80 часов работы пары трения при нагрузке $\sigma_{\text{макс}}=1000$ МПа значение суммарной мощности сигналов АЭ практически равно нулю, $W \approx 0$. Корреляция данного информативного параметра АЭ с интенсивностью изнашивания [5], позволяет, утверждать о работе пары трения в “нанозносный” режим её эксплуатации. При нагрузке в $\sigma_{\text{макс}}=700$ МПа значение суммарной мощности регистрируемых сигналов АЭ после 80 часов работы пары трения фиксировалось на уровне порядка $W \approx 8 \times 10^{-8} \text{B}^2$ (рис.2, $б$, участок 3), что свидетельствует о постепенном выходе с “нанозносного” режима и начале перехода пары трения к режиму нормального изнашивания. Данный режим, как показали исследования, характеризуется достаточно низкой интенсивностью изнашивания. Снижение эксплуатационной нагрузки до уровня $\sigma_{\text{макс}}=600$ МПа, сопровождается дальнейшим увеличением значения суммарной мощности регистрируемых сигналов АЭ до уровня $W \approx 18 \times 10^{-8} \text{B}^2$, что позволяет говорить о переходе пары трения в режим нормального изнашивания.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что по мере

уменьшения эксплуатационной нагрузки происходит снижение износостойкости образованного после введения ТВС металлокерамического слоя. При этом, при нагрузках $\sigma_{\text{макс}} \leq 600$ МПа образование МКС не происходит и пары трения работают в режиме нормального изнашивания. Это можно объяснить с позиции различий структуры МКС, образованного при различных значениях рабочих нагрузок.

Фрактографический анализ поверхностей контакта пар трения после их выхода на установившийся режим изнашивания, показал, что их структуры различаются между собой. При нагрузке $\sigma_{\text{макс}} = 1000$ МПа сформированный МКС состоит из блоков, размер которых незначителен. Уменьшение нагрузки до уровня $\sigma_{\text{макс}} = 700$ МПа приводит к формированию МКС, в структуре которого наблюдается появление блоков большего размера. При нагрузках $\sigma_{\text{макс}} \leq 600$ МПа на поверхности трения образуются лишь отдельные участки МКС.

При этом, как показывает анализ, наблюдается изменение ориентации блоков поверхностных слоёв. Так при нагрузке $\sigma_{\text{макс}} = 1000$ МПа основная масса блоков, из которых состоит образованный МКС, ориентирована в направлении перпендикулярном направлению возникающей силы трения. С уменьшением нагрузки до $\sigma_{\text{макс}} = 700$ МПа происходит изменение ориентации блоков структуры МКС в направлении параллельном направлению трения. Дальнейшее снижение нагрузки до $\sigma_{\text{макс}} \leq 600$ МПа приводит к тому, что ориентация большинства блоков поверхностного слоя практически совпадает с направлением трения.

Выводы. Таким образом, результаты экспериментальных исследований показали, что скорость роста и толщина образовавшегося МКС зависят от величины нагрузок, приложенных к парам трения с введёнными ТВС. Наибольшее значение данных параметров достигается при максимальных нагрузках. При этом реализуется режим “наноизносного” трения. С уменьшением уровня рабочих нагрузок фиксируется граничное их значение, при котором образование МКС не происходит.

Фрактографические исследования показали, что с уменьшением напряжений контактного взаимодействия происходит увеличение размеров блоков структуры поверхностных слоёв и их переориентация в направлении параллельном вектору силы трения. Подобное поведение МКС, вероятно, связано с уменьшением температуры в зоне контакта.

Чувствительной к изменению механизмов трения, как показали исследования, является АЭ. При этом она позволяет фиксировать не только переход от “наноизносного” трения к нормальному износу, но и осуществлять мониторинг данного перехода. Следует также отметить, что использование АЭ делает возможным оптимизацию режимов работы пар трения с точки зрения, как скорости роста, так и толщины образующегося МКС.

Список литературы

1. Булатов В.П. Структурное исследование механизмов безизносного трения конструкционных материалов на основе синергетических представлений / В.П. Булатов, О.Ф. Киреев // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1991. – №2. – С. 56-61.
2. Стадниченко В.Н. Об образовании и функционировании МК покрытия, полученного с помощью ревитализантов / В.Н. Стадниченко, Н.Г. Стадниченко, Р.Н. Джус, О.Н. Трошин // Вестн. науки и техн. – Харьков: ХДНТ и НТУ “ХПИ”, 2004. – Вып. 1(16). – С. 18-27.
3. Філоненко С.Ф. Вплив поверхневих властивостей металокерамічних шарів на акустичну емісію / С.Ф. Філоненко, В.М. Стадніченко // Вісник НАУ. – 2005. – №3. – С. 3-6.
4. Стадниченко В.Н. Автоматизированная система трибодиагностики / Стадниченко В.Н. // Проблемы тертя та зношування. – 2006. – Вып. 46. – С.51-63.
5. Розенберг О.А. О структуре поверхностного слоя стали 100Cr6, обработанной лезвийным инструментом из композита 10. / О.А. Розенберг, С.Е. Делеви, В.Н. Шейкин и др. // Сверхтвердые материалы. – 1999. – №5. – С. 57-62.