

# НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛОЖНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ISSN 2227-1104. Механика. Научные исследования  
и учебно-методические разработки. Вып. 7. Гомель, 2013

---

УДК 621.891:629.4.077–592.59

*П. Н. БОГДАНОВИЧ, С. В. ЛАШЕНКО*

*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель*

## **РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛОВ В ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯХ, РАБОТАЮЩИХ В РЕЖИМЕ «ПУСК-СТОП»**

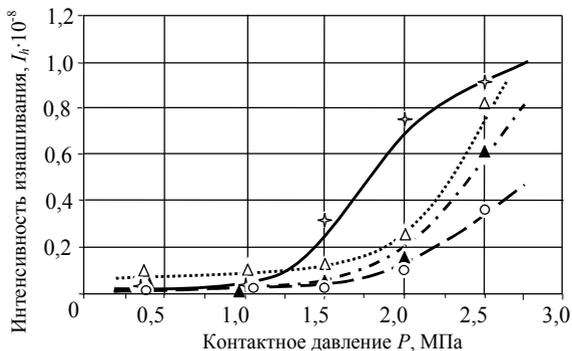
Выявлены закономерности влияния нормальной нагрузки на интенсивность изнашивания бронзы и стали при непрерывном трении скольжения и трении с периодически повторяющимися запуском и остановкой. Обсуждаются особенности разрушения поверхностей трения деталей, эксплуатирующихся в режиме «пуск-стоп».

Детали узлов трения, работающие в нестационарном режиме нагружения, подвергаются усталостному разрушению. Чаще всего этот вид разрушения реализуется после сверхдопустимого износа деталей и появления на поверхности трения дефектов, которые впоследствии играют роль потенциальных очагов зарождения магистральной трещины усталости и увеличивают скорость ее роста [1, 2]. Наиболее интересным в данной области представляется исследование влияния циклических изменений нагрузки на изнашивание сопрягаемых деталей, эксплуатирующихся в присутствии жидкого смазочного материала. Последний играет не только положительную роль, снижая касательную нагрузку, но и отрицательную. Так, при появлении на поверхности трения трещины усталости полярные молекулы смазочного материала оказывают расклинивающее действие (эффект Ребиндера), существенно ускоряя ее рост. При циклическом нагружении (режим «пуск-стоп», реверсивное движение, предварительное смещение) этот эффект должен усиливаться [3,4]. Цель настоящей работы заключалась в выявлении закономерностей изнашивания металлов при непрерывном трении скольжения и трении с периодически повторяющимися запуском и остановкой.

Испытания проводились на машине трения СМТ-1 по схеме «ролик – вкладыш». Ролик был изготовлен из стали 45, а вкладыш – из бронзы

БрОФ10-1. В качестве смазочного материала использовалось индустриальное масло И-8А селективной очистки. Скорость скольжения соответствовала 0,5 и 1,0 м/с, а давление в контакте изменялось от 0,3 до 2,5 МПа. Продолжительность периода непрерывного трения скольжения (динамический контакт  $t_d$ ) составляла 15 и 5 минут, а трения покоя (статический контакт  $t_s$ ) – 2 и 5 минут. Общее время динамического контакта во всех испытаниях составляло 120 минут. Интенсивность изнашивания определялась взвешиванием по потере массы образца, а толщина смазочного слоя – с помощью устройства, принцип действия которого основан на использовании 4-проводной электрической схемы [5]. Принудительное охлаждение трущихся тел и масла отсутствовало.

Установлено, что увеличение контактного давления  $P$  вызывает повышение интенсивности изнашивания  $I_h$  бронзы, что обусловлено уменьшением толщины смазочного слоя  $d$  и его локальным разрушением (рисунок 1). При этом увеличиваются число и размеры пятен непосредственного контакта выступов поверхностей сопрягаемых тел, и возрастает сопротивление мостиков сварки срезу. Соответственно увеличиваются число и размеры адгезионных повреждений, а также контактные напряжения и вероятность образования усталостных трещин. В итоге растет  $I_h$ .

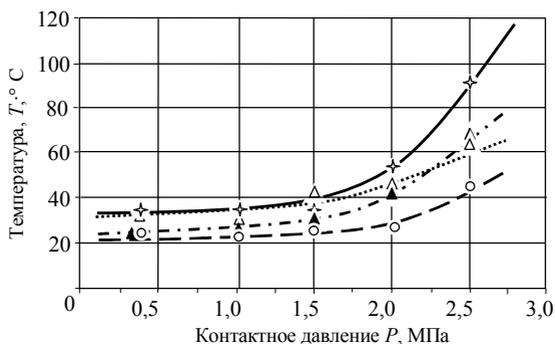


— непрерывное скольжение; ---  $t_d=15$  мин,  $t_s=5$  мин;  
 - · - · -  $t_d=15$  мин,  $t_s=2$  мин; ·····  $t_d=5$  мин,  $t_s=2$  мин

Рисунок 1 – Зависимости интенсивности изнашивания вкладыша от контактного давления при  $v = 0,5$  м/с

В области высоких нагрузок зависимость  $I_h(P)$  более ярко выражена по причине роста температуры  $T$ , сопровождающегося снижением динамической вязкости  $\eta$  смазочного материала. В этом случае смазочный слой становится более тонким. Сказанное подтверждается исследованиями электрического контактного сопротивления  $R_c$ . Так, изменение  $P$  от 0,3 до 2,5 МПа и

температуры масла от 30 до 70 °С приводит к падению  $R_c$  на один-два порядка. Приведенные на рисунке 2 результаты указывают на корреляцию зависимостей температуры масла и интенсивности изнашивания вкладыша от режимов нагружения.



— непрерывное скольжение; ---  $t_d=15$  мин,  $t_s=5$  мин; - · - · -  $t_d=15$  мин,  $t_s=2$  мин;  
 .....  $t_d=5$  мин,  $t_s=2$  мин

Рисунок 2 – Зависимости температуры смазочного материала от контактного давления при  $v = 0,5$  м/с

При переходе от непрерывного трения скольжения к трению с периодически повторяющимися запуском и остановкой бронзовый вкладыш изнашивается менее интенсивно. Согласно известным представлениям должна наблюдаться обратная картина: в периоды запуска и остановки смазочный материал выдавливается из зоны контакта выступов, между ними образуются прочные мостики сварки, срез которых сопровождается интенсивным разрушением поверхностного слоя детали.

Причина такого несоответствия в том, что при непрерывном скольжении монотонно повышается температура, а в области высоких нагрузок этот рост становится более заметным (см. рисунок 2). Это приводит к существенному снижению вязкости масла и переходу к граничному трению, при котором узел трения эксплуатируется длительное время. При трении с периодической остановкой в течение каждого промежутка времени  $t_s$  происходит охлаждение масла, причем, увеличение  $t_s$  относительно периода скольжения  $t_d$  сопровождается падением температуры смазочного материала и, как следствие, снижением линейной интенсивности изнашивания. Так, в наименьшей степени изнашивается вкладыш, работающий при частых пусках и остановках с относительно длинным периодом отдыха ( $t_d=5$  мин,  $t_s=2$  мин), причем температура смазочного материала на  $\sim 20\text{--}50$  °С ниже, чем при других режимах нагружения.

Более высокую интенсивность изнашивания элементов трибосопряжения в периоды остановки, неподвижного контакта и пуска связывают с малой

либо нулевой скоростью скольжения, когда в зону контакта подвижной деталью не подается либо подается малое количество смазочного материала. При этом давление в смазочном слое падает, этот слой продавливается между наиболее высокими выступами, и создаются благоприятные условия для образования мостиков сварки. Разрушение последних при запуске (скольжении) трибосопряжения сопровождается образованием углублений на поверхности трения менее прочного материала и переносом этого материала на поверхность контртела, т. е. реализуется адгезионное изнашивание. Исследования поверхностей трения показали, что при всех режимах нагружения реализуются одновременно не один, а как минимум три вида изнашивания: абразивное, адгезионное и усталостное (рисунок 3).

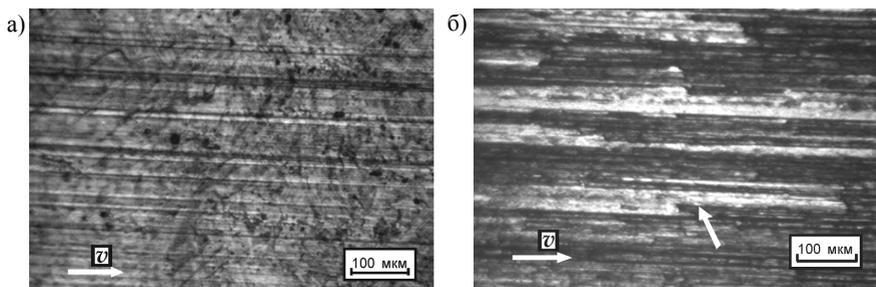


Рисунок 3 – Поверхности трения вкладыша (а) и ролика (б) после изнашивания

О присутствии абразивного изнашивания вкладыша и ролика свидетельствуют бороздки, ориентированные параллельно вектору скорости скольжения  $\vec{v}$  – результат пластического оттеснения бронзы впереди и по краям внедрившихся абразивных частиц. Появление бороздок обусловлено попаданием в зону контакта свободных абразивных частиц, находящихся в масле, и многократно деформированных наклепанных частиц износа ролика. Образование бороздок на поверхности вкладыша из бронзы (рисунок 3, а) вызвано также внедрением выступов поверхности стального ролика. Усталостное изнашивание вкладыша является результатом многократных циклических деформаций поверхностного слоя бронзы внедрившимися выступами поверхности трения ролика. Тот факт, что поверхностный слой вкладыша подвергается усталостному разрушению, подтверждается наличием на изношенной поверхности сетки трещин, ориентированных преимущественно поперек направления вектора относительного перемещения (см. рисунок 3, а).

Об адгезионном изнашивании вкладыша свидетельствует наличие на поверхности трения многочисленных углублений (на снимке – темные пятна, по форме напоминающие круг), образовавшихся вследствие вырывов бронзы при разрушении мостиков сварки. Оставшиеся при этом на вершинах выступов контртела частицы бронзы раскатываются по поверхности контртела,

образуя вытянутые в направлении скольжения полосы. На рисунке 3, б это светлые полосы, одна из которых показана стрелкой. Поскольку при адгезионном изнашивании происходит перенос бронзы на стальное контртело, этот процесс должен сопровождаться либо малой потерей массы ролика либо ее увеличением. Сказанное подтверждается результатами испытаний, изложенными в таблице 1.

Таблица 1 – Влияние режимов нагружения на износ вкладыша и ролика

Режим нагружения	Скорость скольжения, м/с	Массовый износ, кг ( $10^{-8}$ )	
		Вкладыш	Ролик
Непрерывное скольжение	0,5	3,26	-1,70
	1,0	9,76	-0,96
$t_d=15$ мин, $t_s=5$ мин	0,5	0,41	-0,09
	1,0	0,59	0,08
$t_d=15$ мин, $t_s=2$ мин	0,5	0,60	-0,03
	1,0	0,32	-0,26
$t_d=5$ мин, $t_s=2$ мин	0,5	0,83	0,44
	1,0	1,06	0,01

Адгезионное разрушение поверхностного слоя вкладыша становится ведущим видом изнашивания при режимах нагружения, обеспечивающих высокую температуру вспышки на пятнах фактического контакта, т.е. при создании условий для образования более прочных мостиков сварки. Сюда относятся высокие скорость скольжения и контактная нагрузка. При этом усталостное и абразивное изнашивание переходят в разряд сопутствующих видов. Вполне естественно, что рассматриваемая пара трения подвергается окислительному изнашиванию, однако его вклад в износ обоих элементов незначителен.

Таким образом, существующее представление о том, что при периодическом нагружении смазываемого узла трения сопрягаемые детали изнашиваются интенсивнее, чем при непрерывном трении, справедливо только для случая, когда температура деталей и смазочного материала в зоне трения в обоих случаях принудительно поддерживается одинаковой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Bogdanovich, P. N.** Polymer Fatigue / P. N. Bogdanovich, D. V. Tkachuk // Encyclopedia of Tribology. USA. – 2013. – P. 2578–2585.

2 **Bogdanovich, P. N.** Разрушение материалов при динамическом контактно-взаимодействии / P. N. Bogdanovich, D. V. Tkachuk, D. A. Bliznetz // Acta mechanica et automatica. – 2007. – Vol. 1, № 1. – P. 15–18.

3 **Богданович, П. Н.** Трение, смазка и износ в машинах: учеб. для студентов высш. учеб. заведений / П. Н. Богданович, В. Я. Прушак, С. П. Богданович. – Минск: Технология, 2011. – 528 с.

4 **Богданович, П. Н.** Предварительное смещение в металлополимерном фрикционном контакте // Доклады Академии наук Беларуси. – 2005. – № 6. – С. 115–118.

**5 Совершенствование метода электрофизического зондирования при диагностировании эксплуатационных свойств масел / О. В. Холодилов [и др.] // Инженерия поверхностного слоя деталей машин: сб. материалов II междунар. науч.-практ. конф. – Минск: БНТУ, 2010. – С. 231–233.**

*P. N. BOGDANOVICH, S. V. LASHENKO*

## **DESTRUCTION OF METALS IN TRIBO-JUNCTIONS OPERATING IN A START-STOP REGIME**

The regularities of the normal load influence on the wear rate of bronze and steel under the conditions of continuous sliding friction and periodical start-stop one have been established. Features of units' friction surfaces destruction while operating in the start-stop regime are discussed.

Получено 25.09.2013

---

**ISSN 2227-1104. Механика. Научные исследования  
и учебно-методические разработки. Вып. 7. Гомель, 2013**

---

УДК 631.3.06 : 531.391.5

*М. А. БОЙКАЧЕВ, А. О. ШИМАНОВСКИЙ*

*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель*

## **АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО АГРЕГАТА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ БАКА С ЖИДКОСТЬЮ**

Разработана математическая модель движения агрегата с навесной емкостью для жидкости на базе универсального энергетического средства «Полесье». Учет перемещений жидкости выполнен на основе использования твердотельной модели. С применением уравнений Лагранжа II рода получены выражения, позволяющие установить диапазон изменения параметров конструкции, при котором обеспечивается устойчивость прямолинейного движения сельскохозяйственной машины.

Для уменьшения количества проходов агрегата по полю при возделывании сельскохозяйственных культур, сокращения сроков выполнения работ и снижения металлоемкости парка сельскохозяйственной техники предложен вариант комбинированного агрегата на базе универсального энергетического средства (УЭС) «Полесье», включающего емкость для внесения жидких минеральных удобрений (гербицидов, пестицидов, консервантов) со стороны управляемых колес и почвообрабатывающе-посевной агрегат (уборочный) со стороны неуправляемых колес [1, 2].

При эксплуатации УЭС с такой схемой расположения навесных агрегатов должна быть обеспечена не только его прочность, но и продольная, и попе-