



УДК 620.178.3:621.2.082.18
ГРНТИ 55.03.11:55.09.81

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПАР СУХОГО ТРЕНИЯ ОПОРНО-ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА ВОЗДУШНОГО СУДНА

*С.Ю. ЖАЧКИН, доктор технических наук, профессор
«Воронежский государственный технический университет» (г. Воронеж)
Г.И. ТРИФОНОВ
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
А.В. БАКУМЕНКО
ЗАО «РУСАВИАИНТЕР» (г. Воронеж)*

В статье разработан алгоритм исследования физико-механических свойств пар сухого трения скольжения опорно-поворотного устройства воздушного судна. Рассматривается вопрос износостойкости пар сухого трения скольжения. Представлено теоретическое обоснование и практическое подтверждение предлагаемого алгоритма оценки физико-механических показателей пар сухого трения скольжения.

Ключевые слова: износостойкость, пара сухого трения, коэффициент трения, физико-механические свойства, удельное давление, подшипник скольжения.

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR EVALUATING THE AIRCRAFT SUPPORT AND ROTARY DEVICE DRY FRICTION PAIRS WEAR RESISTANCE PHYSICAL AND MECHANICAL PARAMETERS

*S.YU. ZHACHKIN, Doctor of Technical sciences, Professor
Voronezh state technical University (Voronezh)
G.I. TRIFONOV
MESAC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)
A.V. BAKUMENKO
CJSC «RUSAVIAINTER» (Voronezh)*

The article has developed an algorithm for studying the physical and mechanical properties of dry sliding friction pairs of the support and rotary device of an aircraft. The issue of dry sliding friction pairs wear resistance is considered. The theoretical justification and practical confirmation of the proposed algorithm for assessing the physical and mechanical parameters of dry sliding friction pairs are presented.

Keywords: wear resistance, dry friction pair, friction coefficient, physical and mechanical properties, specific pressure, plain bearing.

Введение. Темпы современного развития науки и техники с каждым годом требуют разработки передовых устройств различного назначения в виду физического и морального старения узлов и механизмов [1]. Примером такой задачи является концепция конструкции опорно-поворотного устройства системы радиолокации воздушного судна, которая представлена на рисунке 1.

Характеристики опорно-поворотного устройства систем радиолокации (ОПУСР). Перемещение нагрузки массой 170 кг типа эллипс с размерами: по большей оси – 950 мм, по малой оси – 820 мм, толщиной – 300 мм. При этом, центр поворота по каждой оси должен



находится в пределах толщины нагрузки с минимальным дисбалансом относительно центра поворота. Угол поворота от нейтрального положения, градусов:

- по азимуту до упоров ± 32 ; рабочий, не менее ± 30 ;
- по углу места до упоров $+22, -7$; рабочий, не менее $+20, -7$.

Максимальная угловая скорость, град/сек. – 40; точность позиционирования $\pm 3'$; масса ОПУСР 80 кг. При этом конструкция должна выдерживать нагрузки и оставаться работоспособной при ускорении в 10g, элементы крепления должны воспринимать нагрузку до 15g. Ресурс до первого ремонта 2000 летных часов, с вероятностью безотказной работы 95 %. Условия эксплуатации: ± 60 °С, пыль, частички песка, возможность образования наледи, вибрационные нагрузки.

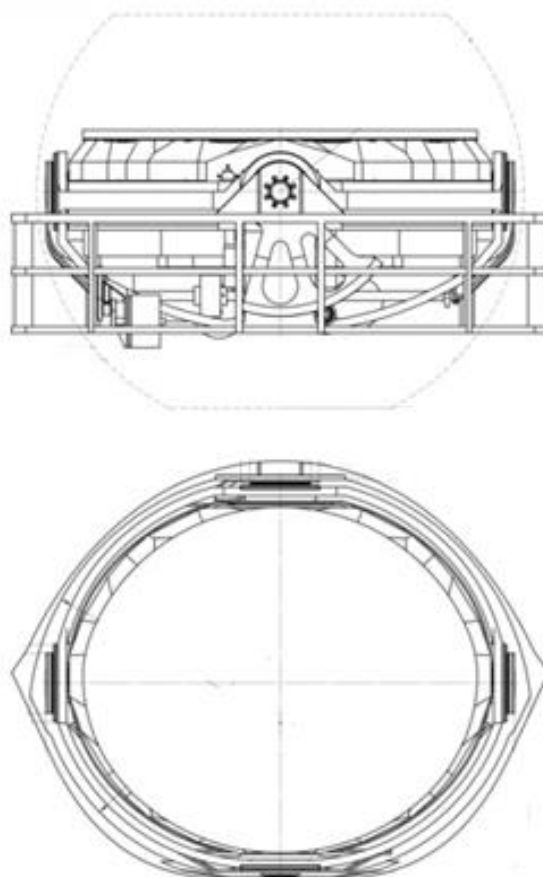


Рисунок 1 – Опорно-поворотное устройство системы радиолокации

Актуальность. В ходе разработки концепции конструкции опорно-поворотного устройства возникли следующие проблемы:

- с учетом динамической нагрузки ($F_r = F_a = 12750$ Н) ни один серийный подшипник качения не проходил по масса-габаритным характеристикам;

- подшипниковый узел является элементом, обеспечивающим жесткость конструкции, вследствие чего возрастает осевая нагрузка;

- смена направления перемещения, реверс – не более 1 секунды.

Ввиду выше описанных критериев, требуется поиск решения по созданию пары сухого трения скольжения, работающей в заданных условиях эксплуатации.

Определяющим фактором работоспособности подшипника сухого трения является его износостойкость [2]. Интенсивность изнашивания и характер износа определяются режимами работы. В свою очередь интенсивность износа оказывает непосредственное влияние на



надежность и безотказность работы в период эксплуатации. При работе в режиме граничного трения или трения без смазки сопротивляемость изнашиванию и образованию задиров во многом определяется видом материала и типом смазочной среды, либо её отсутствием. Выбор элементов трущейся пары осуществляется с учетом их совместимости [3].

Постановка задачи. Для исследования износостойкости пар трения на сегодняшний день разработано большое количество установок и методик, а также различных математических моделей [4], но основная масса базируется на определении конкретных величин, таких как коэффициент трения, скорость скольжения и др.

Определенный спектр исследований посвящен трению с различными смазочными средами [5], но открытым остается вопрос по комбинированному исследованию пар сухого трения, целью которого является определение физико-механических свойств, позволяющих рассчитать стабильные режимы работы при заданных условиях с обеспечением заложенного ресурса.

Целью данной работы является экспериментальный подбор износостойкой пары трения, работающей в режиме сухого трения скольжения, при удельном давлении $350 \text{ (Н/мм}^2\text{)}$ и скорости скольжения до 2 (м/с) . Планируется получение износостойкой, задиростойкой пары трения, работающей в условиях сухого трения скольжения, резкого перепада температур $+60/-60 \text{ }^\circ\text{C}$, и обеспечивающей ресурс работы в $1500\text{--}2000$ часов. С учетом концепции конструкции, представленной на рисунке 1, к паре трения предъявляется ряд требований:

- низкий коэффициент трения;
- высокая износостойкость;
- задиростойкость;
- работа при высоких угловых скоростях (2 м/с);
- работа в условиях сухого трения скольжения;
- смена направления перемещения, реверс – не более 1 сек .

Теоретическая часть. Для подбора материала тела и контртела предлагается применение следующего алгоритма оценки физико-механических свойств:

- определение коэффициента сухого трения;
- определение максимально допустимого удельного давления;
- определение максимальной скорости скольжения;
- определение максимальной температуры на внешней поверхности контртела.

Предлагаемый алгоритм, позволит определить: во-первых, при каких режимах наблюдается стабильная работа пары сухого трения; во-вторых, на основе экспериментальных данных методом аппроксимации определяется функция зависимости, позволяющая с определенной погрешностью описать поведение пары трения в различных условиях.

В связи с выше описанными задачами в качестве испытываемого образца был выбран подшипник сухого трения скольжения типа: вал-втулка. Пример подшипника трения скольжения представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Подшипник скольжения



Для отработки алгоритма и определения требуемых величин использовалось серийное оборудование, применяемое в машиностроении и авиастроении, а именно: тиски с трапецеидальной винтовой парой и токарно-винторезный станок, динамометрический ключ и термомпара.

Коэффициент сухого трения скольжения определялся следующим способом. Взамен губок тисков устанавливалась оснастка, в которой неподвижно закреплялось контртело (втулка) с возможностью свободного осевого вращения тела (вала). Нагрузка производилась через винтовую передачу динамометрическим ключом стрелочного типа. При достижении заданной нагрузки производилось непосредственное измерение момента трения M_{mp} ($H \times m$) между телом и контртелом. Ввиду применения в тисках трапецеидальной резьбы, для расчета задаваемого удельного давления, применялось выражение [6]:

$$N = \frac{2M_{кр}}{d_2 \tan(\beta + \rho)}, \quad (1)$$

где $M_{кр}$ – крутящий момент, прилагаемый к динамометрическому ключу, ($H \times m$); N – нагрузка на тело, ($кгс$); d_2 – средний диаметр резьбы винта, (m); β – угол подъема винтовой линии; ρ – угол трения.

Коэффициент трения качения k определяется:

$$k = M_{mp} / N. \quad (2)$$

Коэффициент трения определяется выражением (3), без учета добавочного давления p_0 , вызываемого силами межмолекулярного притяжения:

$$\mu = \frac{F_{mp}}{(N + S)}, \quad (3)$$

где S – общая площадь, непосредственно трущихся тел, (m^2).

Для дальнейшего исследования необходимо сформировать следующие зависимости:

$fT(V)$, зависимость температуры пар трения от скорости скольжения и удельного давления;

$f\mu(P_{y0})$, зависимость изменения коэффициента трения от удельного давления.

На основе полученных данных и аналитических зависимостей необходимо составить математическую модель, описывающую процессы, протекающие в ходе сухого трения скольжения, с прогнозированием интенсивности износа и ресурса подшипникового узла.

Результаты экспериментальных исследований. Контрольными параметрами, характеризующими механические свойства взяты твердость по Роквеллу (данные получены по результатам 7 измерений), и шероховатость поверхности Ra (длина участка 5 мм).

Экспериментальные данные получены для тела, изготовленного из стали 40Х, твердостью 40-42 (HRC) и Ra 0,6 ($мкм$). В качестве контртела выступают три образца:

образец № 1 – втулка, изготовленная из меднографитового сплава МГр90/3, Ra 0,6 ($мкм$). Данная марка материала предназначена для работы в режиме сухого трения-скольжения;

образец № 2 – втулка, изготовленная из бронзы БрО10Ф1, Ra 0,84 ($мкм$). Данная марка материала предназначена для работы пары трения с применением консистентных смазок. Данный образец проходил испытания без применения смазочных материалов;

образец № 3 – втулка, изготовленная из бронзы БрАЖ9-4, Ra 0,84 ($мкм$). Данная марка материала предназначена для работы в условиях интенсивного трения и истирания. Измерения проводились до разрушения тела, или значительных пластических деформаций.



В ходе проведения экспериментальных исследований были получены результаты, представленные в таблицах 1–3.

Таблица 1 – Коэффициенты трения образца № 1

$F_{тр}, (Н)$	$P_{уд}, (Н/мм^2)$	$k, (м)$	μ
1000	42,486	$9,340 \times 10^{-5}$	0,019
2000	127,459	$6,226 \times 10^{-4}$	0,045
2000	212,433	$3,736 \times 10^{-4}$	0,075
3000	297,406	$4,003 \times 10^{-4}$	0,080

Таблица 2 – Коэффициенты трения образца № 2

$F_{тр}, (Н)$	$P_{уд}, (Н/мм^2)$	$k, (м)$	μ
20	84,304	$1,868 \times 10^{-5}$	0,004
2000	252,912	$6,226 \times 10^{-4}$	0,125
4000	421,521	$7,472 \times 10^{-4}$	0,149
4000	592,129	$5,337 \times 10^{-4}$	0,107
6000	843,042	$5,604 \times 10^{-4}$	0,112

Таблица 3 – Коэффициенты трения образца № 3

$F_{тр}, (Н)$	$P_{уд}, (Н/мм^2)$	$k, (м)$	μ
24	97,333	$2,242 \times 10^{-5}$	0,004
2400	291,999	$7,472 \times 10^{-4}$	0,149
4800	486,665	$8,966 \times 10^{-4}$	0,179
4800	681,331	$6,404 \times 10^{-4}$	0,128
7200	973,331	$6,725 \times 10^{-4}$	0,134

Из полученных результатов прослеживается зависимость: с увеличением удельного давления возрастает коэффициент трения. Прослеживается стремление зависимости к гиперболической функции. График зависимости коэффициента трения от удельного давления представлен на рисунке 3.

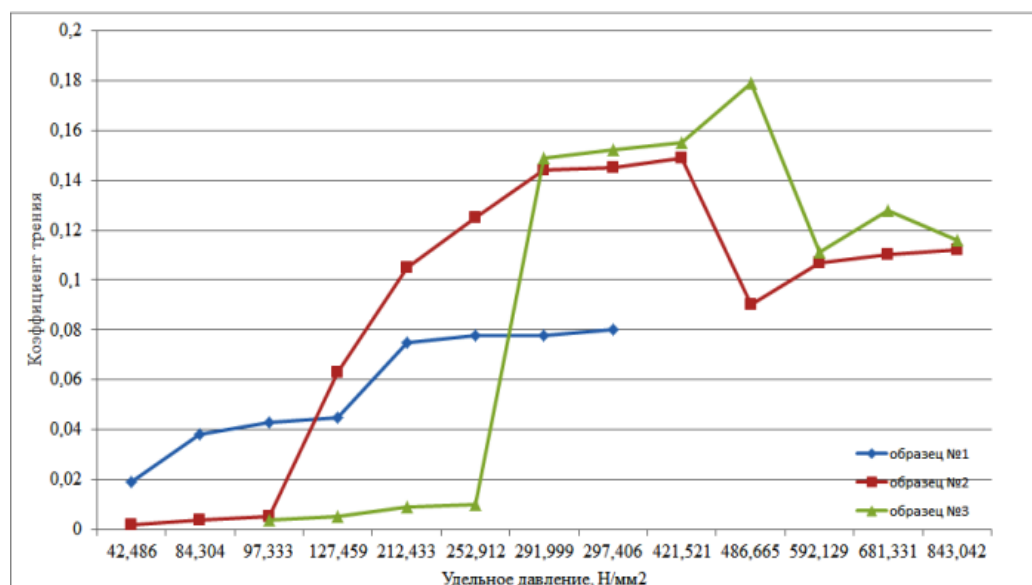


Рисунок 3 – График зависимости коэффициента трения от удельного давления

Анализ графика зависимости коэффициента трения от удельного давления показал, что образец № 1 обладает более стабильными эксплуатационными характеристиками в отличие от образцов № 2 и № 3. Это связано с наличием в образце № 1 графита, который выступает в



качестве твердой смазки. Отсутствие смазки в образцах № 2 и № 3 показывает резкое возрастание коэффициента трения. Резкое падение коэффициента трения в образцах, свидетельствует о протекании процесса переноса материала контртела на поверхность тела, и как следствие материал контртела выступает как твердая смазка. В связи с этим и происходит снижение значения коэффициента трения. Данный вид упрочнения в достаточной степени изучен [7].

Экспериментальное исследование показало, что коэффициент трения образца № 1 более стабилен, но при этом образец № 1 не способен воспринимать большое удельное давление вследствие своей хрупкости. Образец № 2 за счет своей пластичности воспринимает значительные удельные давления, но при этом значения коэффициента трения не стабильны. Коэффициент трения образца № 3 показал наиболее оптимальные значения, ввиду меньшей пластичности в сравнении с образцом № 2, при этом характер изменения коэффициента трения аналогичен образцу № 2. Данный факт подтверждает, что наличие твердых смазывающих частиц положительно влияет на режим работы подшипника сухого трения, но при этом значительно ограничивает предельно допустимое удельное давление [8].

Дальнейшее исследование образцов проводилось на тепловые и скоростные характеристики. Время t показывает, за какой промежуток времени, поверхность пары трения достигает температуры 100 °С, температура окружающей среды составляла -2 °С. Скорость скольжения V составляет 0,2 (м/с). Измерение температуры проводилось при помощи хромоникелевой термопары. В ходе проведения экспериментальных исследований были получены результаты, представленные в таблицах 4–6.

Резкое снижение коэффициента трения, как это видно из таблицы 5 обусловлено налипанием материала втулки на вал.

Таблица 4 – Испытание образца № 1

$F_{тр}, (Н)$	$P_{уд}, (Н/мм^2)$	$t, (с)$	μ
366,153	102,163	30	0,032
1464,614	204,326	15	0,064

Таблица 5 – Испытание образца № 2

$F_{тр}, Н$	$P_{уд}, Н/мм^2$	$t, (с)$	μ
720,865	176,635	24	0,063
2906,344	352,070	40	0,127
3329,709	528,106	20	0,097
4393,843	704,141	20	0,096

Таблица 6 – Испытание образца № 3

$F_{тр}, Н$	$P_{уд}, Н/мм^2$	$t, (с)$	μ
869,615	202,519	20	0,076
3478,46	405,037	32	0,152
3981,921	607,556	15	0,116
5263,46	810,074	16	0,115

В таблицах 7–8 представлены зависимости температуры от скорости скольжения. Измерения проводились в течении 1 минуты с постоянной радиальной нагрузкой F_p .



Таблица 7 – Температурные характеристики образца № 1

$V, м/с$	0,031	0,063	0,131	0,204	0,262	0,371
$T, °C$	16	20	30	40	78	130
$F_p, (H)$	400					
$P_{уд}, Н/мм^2$	33,3					

Таблица 8 – Температурные характеристики образца № 2

$V, м/с$	0,031	0,063	0,131	0,204	0,262	0,371
$T, °C$	27	38	42	100	200	280
$F_p, (H)$	400					
$P_{уд}, Н/мм^2$	16,6					

Таблица 9 – Температурные характеристики образца № 3

$V, м/с$	0,031	0,063	0,131	0,204	0,262	0,371
$T, °C$	25	40	45	98	205	270
$F_p, (H)$	400					
$P_{уд}, Н/мм^2$	20					

Результаты испытаний показали явное различие поведения материала при равных скоростях скольжения и нагрузке. Было выявлено, что удельное давление образца № 1 в два раза превышает удельное давление образца № 2 и в 1,66 раза образца №3. Это связано с характеристиками пластичности материала: образец № 2 более пластичен, как следствие, площадь контакта выше, а удельное давление ниже; образец № 3 более пластичен в сравнении с образцом № 1, но менее пластичен в сравнении с образцом № 2. Различие температур объясняется присутствием в составе образца № 1 графита, который выступает в качестве твердой смазки, снижая коэффициент трения, тем самым происходит меньшее выделение тепла. В случае с образцами № 2 и № 3 твердая смазка отсутствуют, как следствие происходит большее выделение тепла.

После проведения испытаний наблюдается перенос материала контртела в различной степени. При этом шероховатость поверхности в зоне контакта, где протекал процесс сухого трения, в значительной степени изменилась лишь на образце № 2. На образце № 1 наблюдалось выделение графита в зоне контакта.

На рисунках 3 и 4 представлен образец контртела и тела после испытаний на трение с изменением скорости скольжения. С уверенностью можно сказать, что в представленных условиях работы с наилучшей стороны показали себя самосмазывающиеся подшипники сухого трения и алюминиево-железистая бронза. Оловянную бронзу, как и было заявлено ранее, невозможно применять для сухого трения в виду диффузионного переноса материала с тела на контртело.

При испытании образца № 1 износ пар трения выражался в виде мелкодисперсной стружки, при наличии масляных каналов на теле, а также разделением на составляющие фракции (рисунки 4б и 5). При испытании образца № 2, процесс износа выражался как перенос массы с тела на контртело (рисунок 4а), в результате чего образовывается защитное покрытие. Процесс износа образца № 3 аналогичен процессу истирания образца № 2. Экспериментально полученное явление описывается как процесс повышения износостойкости поверхности [10].

После проведения экспериментальных исследований было произведено повторное измерение качества поверхности, в зоне «а» Ra 2,6 (мкм), в зоне «б» Ra 0,8 (мкм), для образца № 3 шероховатость поверхности составила Ra 1,6 (мкм).

Результаты измерений и визуальный осмотр свидетельствуют о том, что в случае с образцами № 1 и № 3 поверхности трения в процессе испытаний притерлись, процесс переноса материала контртела на тело протекал замедленно. В случае с образцом № 2 на поверхности трения образовывались задиры, и наблюдался интенсивный перенос материала с контртела на тело.

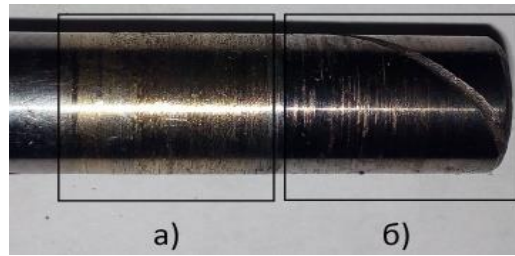


Рисунок 4 – Контртело после испытаний на трение: а – образец № 2; б – образец № 1



Рисунок 5 – Образец № 1 после испытаний с изменением скорости скольжения



Рисунок 6 – Образец № 2 после испытаний с изменением скорости скольжения

Основываясь на полученных экспериментальных данных, были построены графики зависимостей, представленные на рисунках 7–11.

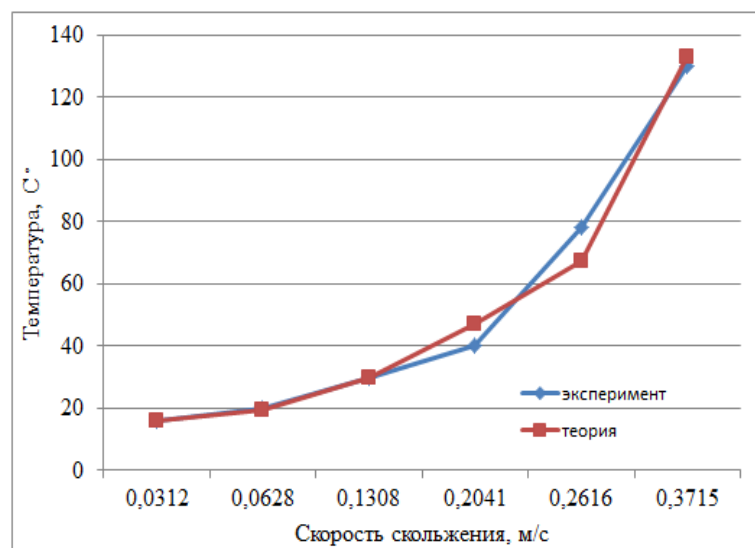


Рисунок 7 – Функция зависимости температуры от скорости скольжения для образца № 1

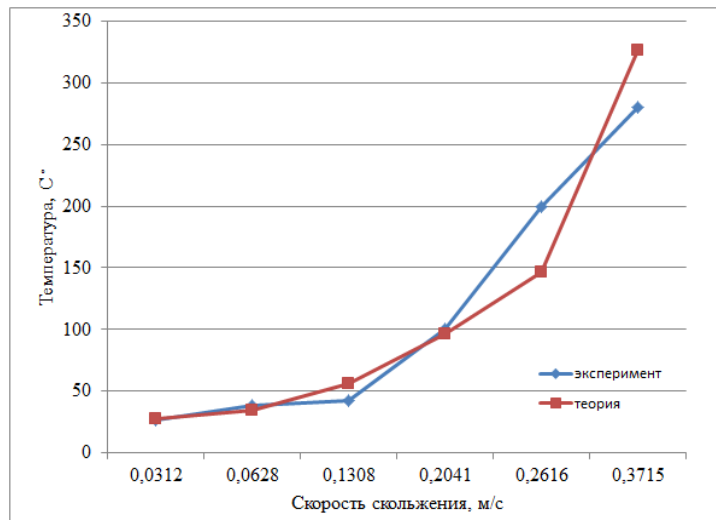


Рисунок 8 – Функция зависимости температуры от скорости скольжения для образца № 2

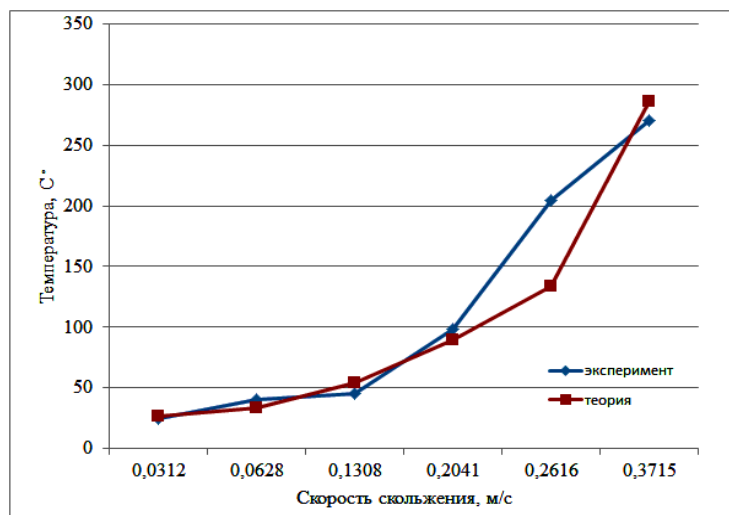


Рисунок 9 – Функция зависимости температуры от скорости скольжения для образца № 3

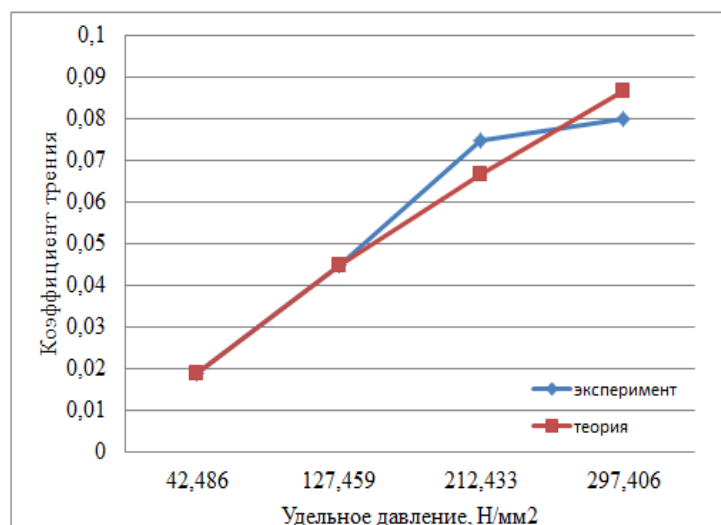


Рисунок 10 – Функция зависимости коэффициента трения от удельного давления для образца № 1

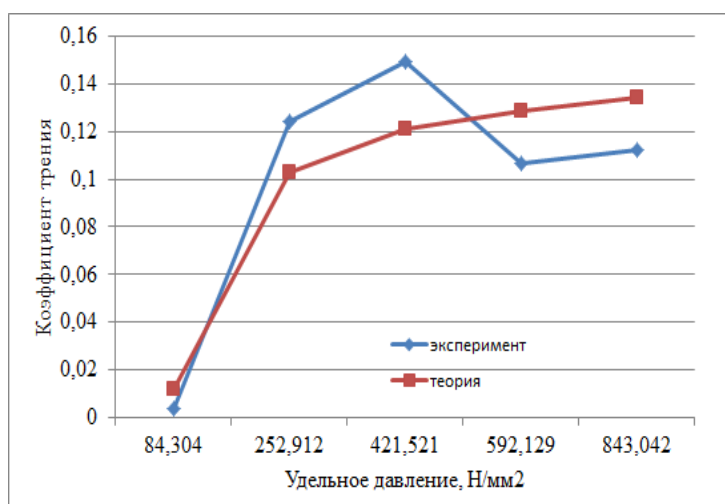


Рисунок 11 – Функция зависимости коэффициента трения от удельного давления для образца № 2

На основе полученных графических зависимостей, методом аппроксимации были получены функции зависимости $fT(V)$ и $f\mu(P_{y0})$.

Для пары трения МГр90/3 – сталь 40Х функции имеют следующий вид:

$$fT(V) = e^{2,578+6,229V} \quad (4)$$

Коэффициент корреляции составляет 0,991; коэффициент детерминации 0,982; средняя ошибка аппроксимации 6,21 %.

$$f\mu(P_{y0}) = 0,0010x^{0,784} \quad (5)$$

Коэффициент корреляции составляет 0,976; коэффициент детерминации 0,954; средняя ошибка аппроксимации 5,34 %.

Для пары трения БрО10Ф1 – сталь 40Х, функция отличается лишь коэффициентами и имеет следующий вид:

$$fT(V) = e^{3,075+7,308V} \quad (6)$$

Коэффициент корреляции составляет 0,949; коэффициент детерминации 0,901; средняя ошибка аппроксимации 15,32 %.

$$f\mu(P_{y0}) = 0,148 - \frac{11,45}{x} \quad (7)$$

Коэффициент корреляции составляет 0,901; коэффициент детерминации 0,813; средняя ошибка аппроксимации 8,17 %.

Для пары трения БрАЖ9-4 – сталь 40Х, функция отличается лишь коэффициентами и имеет следующий вид:

$$fT(V) = e^{3,075+6,953V} \quad (8)$$



Коэффициент корреляции составляет 0,935; коэффициент детерминации 0,852; средняя ошибка аппроксимации 15,52 %.

$$f \mu(P_{yo}) = 0,148 - \frac{11,45}{x}. \quad (9)$$

Коэффициент корреляции составляет 0,901; коэффициент детерминации 0,813; средняя ошибка аппроксимации 8,17 %.

Полученные зависимости в достаточной степени (погрешность не превышает 20 %, данная величина обусловлена точностью измерения скорости скольжения, а также точностью измерения температуры термопарой), описывают поведение пары трения в заданных условиях работы.

Выводы. Разработанный алгоритм оценки физико-механических свойств пар сухого трения скольжения позволяет с минимальной погрешностью (ошибка аппроксимации не более 20 %) описать процесс работы, степень износа методом взвешивания тела и контртела, а также определить допустимые стабильные режимы работы.

Экспериментально установлено, что для работы в тяжёлых условиях необходимо произвести упрочнение поверхности трения, с целью повышения предельно допустимого удельного давления не более 450 (H/mm^2) и повышения задиростойкости, при скорости скольжения до 2 (m/c).

На основе полученных результатов дальнейшую разработку метода упрочнения поверхности сухого трения скольжения необходимо проводить в трех направлениях: упрочнение поверхности тела; упрочнение поверхности контртела; упрочнение поверхности тела и контртела, с обеспечением износа по контртелу.

Данные выводы сделаны на основе полученных оригинальных результатов эксперимента. Исследованные пары трения: пара № 1 сталь 40X – сплав МГр90/3; пара № 2 сталь 40X – бронза марки БрО10Ф1; пара № 3 сталь 40X – бронза марки БрАЖ9-4 показали, что из трех исследованных образцов возможно применение образца № 3 (пара трения сталь 40X – бронза БрАЖ9-4) при заданных нагрузках и условиях эксплуатации.

Ввиду того, что при достижении удельного давления порядка 300–350 (H/mm^2), происходит разрушение тела (образец № 1), пластическая деформация (образец № 2). При этом коэффициент сухого трения скольжения не превышает значения 0,1 для образца № 1, и превышает значение 0,1 при достижении границы удельного давления 250 (H/mm^2) для образца № 2.

Также было установлено, что пластические деформации и высокие удельные давления приводят к тому, что материал тела по средствам диффузионного схватывания, переносится на контртело с образованием задигов на поверхности трения скольжения.

На основе полученных результатов и сделанных выводов можно констатировать, что для работы в тяжёлых условиях сухого трения скольжения необходимо произвести научно-аналитический подбор технологии по увеличению износостойкости поверхностей (например, газотермические технологии обработки деталей) [9, 10] или разработать метод упрочнения пары сухого трения скольжения сталь 40X – бронза БрАЖ9-4 с целью повышения предельно допустимого удельного давления порядка 450 (H/mm^2) и обеспечения коэффициента трения не более 0,15 при предельно допустимом удельном давлении и скорости скольжения 2 (m/c).

Предложенный алгоритм оценки физико-механических свойств пар сухого трения скольжения зарекомендовал себя как базовая основа для получения экспериментальных данных, на основании которых методом аппроксимации строятся зависимости различного рода. Полученные результаты позволяют определить оптимальные и граничные режимы работы исследуемой пары сухого трения скольжения.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бубнов Н.А., Лазарев С.В., Трифонов Г.И., Янин А.Н. Имитационное моделирование процессов восстановления вооружения и военной техники // Современные наукоемкие технологии. № 12. 2018. С. 20–24.
2. Трифонов Г.И., Митрофанов Д.В. Усовершенствование авиационных подшипников скольжения с помощью газотермической обработки и конструкторских модификаций // Воздушно-космические силы. Теория и практика. № 4. 2017. С. 61–68.
3. Крагельский И.В., Алисин В.В. Трение изнашивание смазка справочник // М.: Машиностроение, 1978. Книга 1. 400 с.
4. Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник / под ред. К.В. Фролова, Е.А. Марченко // М.: Машиностроение, 2008. 384 с.
5. Хопин П.Н. Оценка долговечности твердо смазочных покрытий на основе анализа топографии поверхностей трения // Трение и износ, 1995. Т. 16. № 4. С. 787–793.
6. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя в 3-х т.: Т. 2. 8-е изд. переработанное и дополненное / под редакцией Жестковой И.Н. // М.: Машиностроение, 2001. 912 с.
7. Чичинадзе А.В., Берлинер Э.М., Браун Э.Д. и др. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) // М.: Машиностроение, 2003. С. 107–139.
8. Ярош В.М., Моисеев А.А., Броновец М.А. Исследование материалов на трение и износ в открытом космическом пространстве на орбите вокруг Луны // Трение и износ. 2003. Т. 24. № 6. С. 626–635.
9. Жачкин С.Ю., Лазарев С.В., Трифонов Г.И. Определение физико-механических свойств деталей летательных аппаратов в авиационной промышленности после комбинированной плазменной обработки // Воздушно-космические силы. Теория и практика. № 2. 2017. С. 18–25.
10. Ильющенко А.Ф., Шевцов А.И., Оковитый В.А., Громыко Г.Ф. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование // Минск: Беларус. навука, 2011. 357 с.

REFERENCES

1. Bubnov N.A., Lazarev S.V., Trifonov G.I., Yanin A.N. Imitacionnoe modelirovanie processov vosstanovleniya vooruzheniya i voennoj tehniki // Sovremennyye naukoemkie tehnologii. № 12. 2018. pp. 20–24.
2. Trifonov G.I., Mitrofanov D.V. Usovershenstvovanie aviacionnyh podshipnikov skol'zheniya s pomosh'yu gazotermicheskoy obrabotki i konstruktorskih modifikacij // Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika. № 4. 2017. pp. 61–68.
3. Kragel'skij I.V., Alisin V.V. Trenie iznashivanie smazka spravochnik // M.: Mashinostroenie, 1978. Kniga 1. 400 p.
4. Kombalov V.S. Metody i sredstva ispytaniy na trenie i iznos konstrukcionnyh i smazochnyh materialov: spravochnik / pod red. K.V. Frolova, E.A. Marchenko // M.: Mashinostroenie, 2008. 384 s.
5. Hopin P.N. Ocenka dolgovechnosti tverdo smazochnyh pokrytij na osnove analiza topografii poverhnostej treniya // Trenie i iznos, 1995. T. 16. № 4. pp. 787–793.
6. Anur'ev V.I. Spravochnik konstruktora-mashinostroitel'ya v 3-h t.: T. 2. 8-e izd. pererabotannoe i dopolnennoe / pod redakciej Zhestkovoij I.N. // M.: Mashinostroenie, 2001. 912 p.
7. Chichinadze A.V., Berliner `E.M., Braun `E.D. i dr. Trenie, iznos i smazka (tribologiya i tribotehnika) // M.: Mashinostroenie, 2003. pp. 107–139.
8. Yarosh V.M., Moisehev A.A., Bronovec M.A. Issledovanie materialov na trenie i iznos v otkrytom kosmicheskom prostranstve na orbite vokrug Luny // Trenie i iznos. 2003. T. 24. № 6. pp. 626–635.



9. Zhachkin S.Yu., Lazarev S.V., Trifonov G.I. Opredelenie fiziko-mehanicheskikh svojstv detalej letatel'nyh apparatov v aviacionnoj promyshlennosti posle kombinirovannoj plazmennoj obrabotki // *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika*. № 2. 2017. pp. 18–25.

10. Il'yuschenko A.F., Shevcov A.I., Okovityj V.A., Gromyko G.F. Processy formirovaniya gazotermicheskikh pokrytij i ih modelirovanie // Minsk: Belarus. navuka, 2011. 357 p.

© Жачкин С.Ю., Трифонов Г.И., Бакуменко А.В., 2019

Жачкин Сергей Юрьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированного оборудования машиностроительного производства, «Воронежский государственный технический университет», Россия, 394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14, zhach@list.ru.

Трифонов Григорий Игоревич, младший научный сотрудник научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, trifonov_gi@mail.ru.

Бакуменко Александр Викторович, ведущий инженер-конструктор, ЗАО «РУСАВИАИНТЕР» (г. Воронеж), Россия, 394004, г. Воронеж, ул. Ленинградская, 31-В, bakumenko1992@list.ru.