

УДК 536.12: 621.891

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛАХ ТРЕНИЯ

Ю. В. ЛЫСЕНКО<sup>а+</sup>, В. А. БАЛАКИН<sup>а</sup>

Проведен анализ экспериментальных методов измерения температуры в зоне фрикционного контакта тормозов железнодорожного подвижного состава, метрополитена, самолетов, тележек ракетного трека, а также при испытаниях образцов на инерционных стендах.

**Ключевые слова:** тормоз, температура, термопара, интенсивность фрикционного тепловыделения, инерционный стенд.

**Введение.** Обеспечение безопасности движения на транспорте требует проведения экспериментальных исследований теплового режима работы тормозов в натуральных условиях их работы. Вместе с тем актуальной является необходимость развития методов измерения температур в зоне фрикционного контакта на специальных испытательных стендах, моделирующих процессы торможения при больших ускорениях замедления. Особое внимание уделяется метрологическому обеспечению температурных измерений.

Для измерения нестационарных температур при трении используются контактный и пирометрический методы [1–3]. Пирометрический метод нашел применение в лабораторных условиях при исследовании локальных источников теплоты, например, в контакте сапфир—сталь [2]. Контактный метод позволяет измерять температуру не только на поверхности трения непрозрачных твердых тел, но и на любом расстоянии от поверхности трения трущихся пар. Поэтому он получил широкое распространение при исследованиях теплового режима работы в натуральных теплонагруженных узлах трения.

Для измерения нестационарных температур и температурных полей используются термоэлементы, содержащие спай двух разнородных металлов. Спаи получают либо методом сварки (рис. 1, а–г), либо соединением изолированных термоэлектродов через поверхностные слои контртела (рис. 1, д). При этом “горячим” спаем служат нагретые поверхностные слои контртела, либо нагретая пленка, образовавшаяся в результате переноса поверхностных слоев с исследуемого образца на контртело, либо наволакиваемые в результате пластической деформации, нагретые поверхностные слои твердого тела, в котором измеряется температура.

Термопара, полученная сваркой термоэлектродов встык, имеет наименьший размер чувствительного элемента горячего спаи (рис. 1, а). Чувствительный элемент может иметь также шаровую (рис. 1, б), полушаровую (рис. 1, в) головки или иметь вид плоской тонкой металлической пластинки (рис. 1, г).

**Результаты стендовых измерений температур трения.** В работе [4] описаны испытания образцов на специаль-

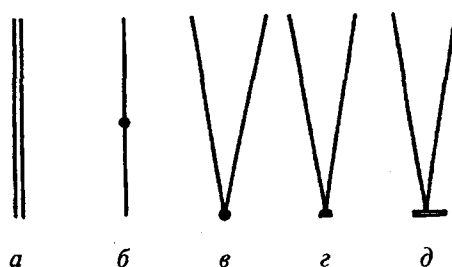


Рис. 1. Конструкции термопар: а – без сваренного “горячего спаи”; б – термоэлектроды сварены встык; в – с шаровым горячим спаем; г – с полушаровым горячим спаем; д – с пятчковым горячим спаем

а Государственный технический университет им. П. О. Сухого, Беларусь, 246746, г. Гомель, пр. Октября 48.

+ Автор, с которым следует вести переписку.

ном стенде. Пару трения образуют вращающийся диск диаметром 640 мм, изготовленный из стали 3, и стальной цилиндрический образец диаметром: 11,3; 16,0 и 19,5 мм, соприкасающийся торцевой поверхностью с цилиндрической поверхностью диска. Окружная скорость диска изменялась в пределах от 1 до 98 м/с. В образце нормально к поверхности контакта были просверлены три отверстия диаметром 0,3 мм, в которые вставлялись и закреплялись изолированные термоэлектроды из алюмеля диаметром  $0,03 \div 0,10$  мм, образующие термопары (сталь—алюмель). Особенность полученной термопары в том, что она не имеет постоянного горячего спая. Он образуется непрерывно в зоне контакта, перемещаясь по мере истирания металла, а вместе с ним и термоэлектродов. Замер температур может продолжаться до полного изнашивания рабочей части образца. На рис. 2 приведены распределения температур по контактной поверхности образца. Термопара 1 расположена в начале контактной поверхности, 2 — в центре образца, 3 — в конце линии контакта.

Видно, что температура в различных точках контактной поверхности отличается. Максимальная наблюдается в конце линии контакта. С ростом скорости температура поверхности трения увеличивается.

Более тонкие измерения температур в зоне фрикционного контакта описаны в работе [5]. Здесь температура поверхности трения измерялась с помощью микротермопар вдоль линии контакта и температур на расстоянии 0,2—0,3 мм от поверхности трения. Цилиндрический образец из стали ШХ15 диаметром  $d = 5$  мм соприкасался торцом с плоской поверхностью диска из стали 1Х18Н10Т, вращающегося с постоянной угловой скоростью  $\omega = 24$  об/с. При этом линейная скорость относительного скольжения  $v = 22$  м/с, удельная нагрузка на номинальную площадь контакта  $p_a = 0,5$  МПа. Для измерения температур использовались пять медь-константановых термопар из термоэлектродов диаметром 0,1 мм. Три из них (рис. 1, з) выводились на поверхность трения стержня и устанавливались в следующем порядке: 1 — у передней по ходу движения кромки, 2 — в центре, 3 — у задней кромки образца. Две микротермопары (рис. 1, а) были установлены: 4 — на расстоянии 0,3 мм от поверхности трения у передней кромки, 5 — на расстоянии 0,2 мм от поверхности трения у задней кромки. Технология установки комбинированных и искусственных термопар подробно описаны в работах [6—8]. Результаты измерений приведены на рис. 3.

На кривой 1 видны разрывы записи (нарушение фрикционного контакта), на кривых 2—4 — ярко выраженные температурные скачки. Амплитудно-частотные характеристики кривых 1—3 снятых в различных точках поверхности трения различаются между собой и не соответствуют частоте вращения диска. Поэтому связи происхождения температурных скачков с динамическими эффектами нет. Кривые 4 и 5 эквидистантны кривым 1 и 3. Из приведенных данных видно, что температура возрастает вдоль линии контакта от передней кромки образца к задней. Измерению температуры в тяжело нагруженном узле трения посвящена работа [9].

При измерениях температур трения также применяется метод естественных термопар [10—13].

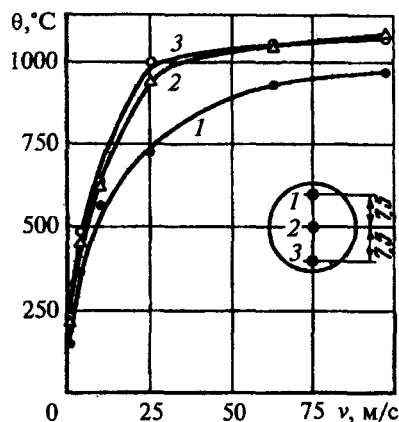


Рис. 2. Зависимости температуры поверхности трения образца от окружной скорости диска: 1—3 — температуры в соответствующих точках

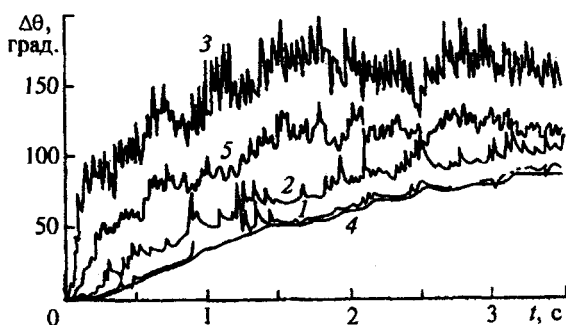


Рис. 3. Приращение температуры в образце в зависимости от времени: 1 — на поверхности трения у передней по ходу движения кромки; 2 — в центре поверхности трения; 3 — на поверхности трения у задней кромки образца; 4 — на расстоянии 0,3 мм от поверхности трения у передней кромки; 5 — на расстоянии 0,2 мм от поверхности трения у задней кромки

Для измерения быстро протекающих тепловых процессов продолжительностью  $\leq 1$  с используют термопары из термоэлектродов диаметром до 0,05 мм. Низкая прочность таких термоэлектродов требует специальных мер по защите их от случайных механических повреждений возникающих в процессе работы стенда или натурального узла трения. "Холодные" концы термоэлектродов следует припаивать к малогабаритному разъему, соединить держатель с корпусом разъема втулкой, зафиксировать положение термоэлектродов внутри втулки веществом, затвердевающим с течением времени и являющимся термоэлектроизолятором (например, эпоксидной смолой). Конструкция такого датчика для стендовых испытаний приведена на рис. 4. В цилиндрическом образце 1 может устанавливаться до шести термопар, горячие спаи которых расположены вдоль всей длины образца [8]. Держатель 2 крепится в нагрузочном узле стенда.

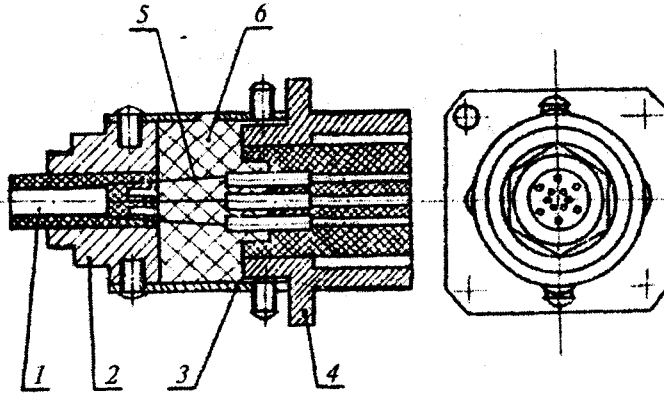


Рис. 4. Датчик для стендовых испытаний: 1 — образец; 2 — держатель; 3 — соединительная втулка; 4 — разъем; 5 — термоэлектрод; 6 — эпоксидная смола

Наиболее теплонагруженными являются фрикционные тормоза самолетов. В процессе посадочного пробега с торможением  $\approx 95\%$  кинетической энергии, за исключением аэродинамического сопротивления, превращается в теплоту. Наибольшая температура в тормозах самолета возникает при торможении длительностью  $\approx 30-40$  с. Например, тормозное колесо самолета ТУ-104 при посадочной скорости 280 км/ч поглощает кинетическую энергию равную 42 МДж [14]. Поэтому в авиапромышленности уделяется большое внимание испытаниям тормозов.

Экспериментальные исследования температур в тормозном барабане из легированного чугуна в паре с пластмассой проводились на инерционном стенде, имитирующем режим работы натурального тормоза. В тормозном барабане были установлены хромель — алюмелевые термопары на различных глубинах  $\Delta$  от поверхности трения. На рис. 5 приведены распределения температуры в тормозном барабане в зависимости от времени торможения.

Температура на глубине 0,19 мм от поверхности трения в начале торможения резко возрастает и через 5—10 с достигает 1000 °С. Эта температура держится 2—3 с. Затем она быстро падает, уменьшаясь к концу торможения до величины объемной температуры 400—500 °С, которая оказывает длительной воздействие на тормозной узел.

Серьезное внимание уделялось также экспериментальному исследованию теплового режима работы железнодорожных тормозов [15]. Испытания проводились, как на специальном стенде, воспроизводящем близкие к натурным условия работы колес и колодок при торможении, так и непосредственно на подвижном составе, оборудованном специальной измерительной аппаратурой, во время движения. Измерения температур проводились в шести точках тормозной колодки искусственными медно-константановыми термо-

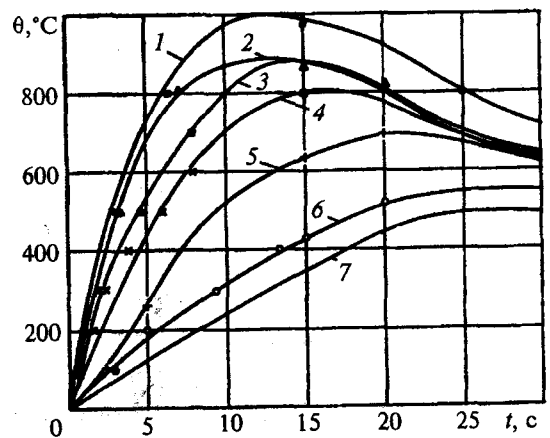


Рис. 5. Зависимость температуры в тормозном барабане от времени торможения: 1 —  $\Delta = 0,19$  мм; 2 — 0,26; 3 — 0,55; 4 — 0,84; 5 — 1,82; 6 — 7,70; 7 —  $\Delta = 11,72$  мм

парами, которые устанавливались на различных расстояниях от поверхности трения, как по глубине (20÷30 мм), так и по длине колодки. Колодка на стенде закреплялась в вагонный башмак, подвешенный также, как на вагоне.

Результаты изменения коэффициента трения чугунной колодки и температуры в пяти точках от времени торможения представлены на рис. 6.

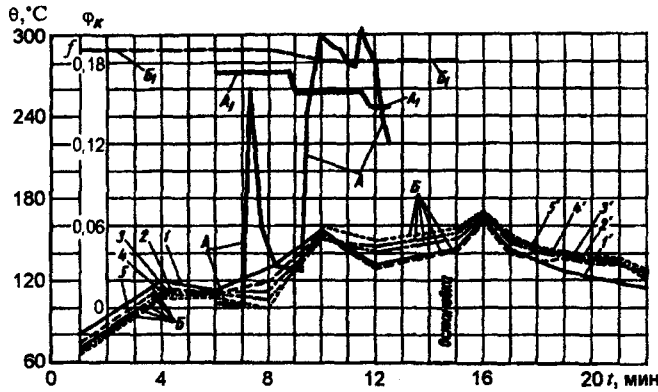


Рис. 6. Изменения температуры и коэффициента трения чугунной колодки от времени в процессе торможения: 1—5 — зависимости распределения температур в центре колодки от времени торможения по глубине расположения термопар от поверхности трения (4÷20 мм); 1'—5' — температурные кривые охлаждения колодки в этих же точках, после остановки стенда

Колодки перед испытанием притирались к поверхности трения бандажа колеса.

Более точные измерения температуры термопарой 1 проводились через каждые 15 с, результаты которых представлены кривой А (рис. 6). Измерения коэффициента трения при этом — кривой А<sub>1</sub>. Процесс измерения температур через большие промежутки времени (2—4 мин) фиксировал более плавные кривые В. Коэффициент трения изменялся от 0,19 до 0,18 (кривая В<sub>1</sub>).

Были проведены измерения температуры вдоль дуги чугунной колодки. При испытаниях имитировался процесс многократных торможений, каждое из которых имело продолжительность 19 мин, после чего колодка на 5 мин отводилась от колеса. С каждым последующим торможением температура колодки увеличивалась. В конце четвертого торможения температура у задней грани колодки достигала 500 °С.

Результаты натуральных испытаний. На рис. 7 приведены температурные кривые, замеренные в чугунной тормозной колодке, установленной на колесной паре моторного вагона московского метрополитена [15]. Испытания проводились на трассе длиной 9486 м от станции Сокол до станции

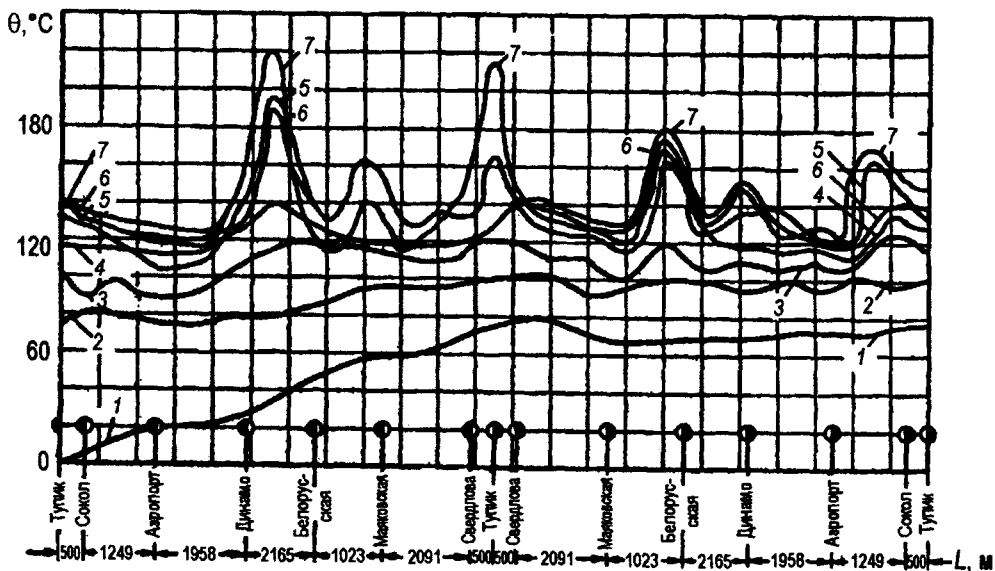


Рис. 7. Изменения температуры в колодке во время движения на трассе метрополитена: 1—7 — номера рейсов

площадь Свердлова в прямом и обратном направлении. Измерения производились медь-константановой термопарой, установленной в центре чугунной тормозной колодки на расстоянии 10 мм от поверхности трения. Измерения температуры в тормозной колодке начались с момента движения поезда из депо станции "Сокол", когда температура бандажа была равна температуре окружающего воздуха, и производились в конце торможения на каждой станции, а также на перегоне, примерно на половине расстояния между станциями.

В рейсах 4–7 осуществлялось торможение на станциях "Динамо", "Маяковская" и "Площадь Свердлова" в прямом направлении, а также на станциях "Маяковская", "Динамо", "Аэропорт" и "Сокол" в обратном направлении. Максимальная температура при этом на глубине 10 мм от поверхности трения достигала 220 °С.

Общим недостатком этих испытаний являлось то, что искусственные термопары с шаровым спаем устанавливались в отверстиях на достаточно большой глубине от поверхности трения. Между горячим спаем термопар и колодкой существовало термическое сопротивление непрогнозируемой величины. Поэтому показания термопар были заниженными.

В настоящее время в России действует ГОСТ 23.210–80 в соответствии с которым при испытании тормозов "горячий" спай шаровой формы термопары устанавливается на расстоянии 1 мм от поверхности трения в специально засверленном отверстии [16].

Таким методом проводятся измерения температур в тормозах автомобилей при натурных испытаниях [17].

На рис. 8 приведены результаты измерений температур поверхности трения ракетного трека при скоростях до 230 м/с. [18]. Геометрическая форма образца и установка термопар в него показана на рис. 9. Образец имеет тавровое сечение. Перпендикулярно поверхности трения в нем были просверлены отверстия, в которые устанавливались хромель-алюмелевые термоэлектроды. На поверхность трения корпуса термопары, изготовленного из материала образца, наносился тонкий слой хрома. Температуры измерялись в т. 1 и 2 (рис. 9, а). Установка с образцами разгонялась по рельсовой направляющей порохowymi реактивными двигателями (двухступенчатый разгон) до скорости 230 м/с, затем тормозилась.

Температура в т. 1 достигала 900 °С, а в т. 2 — 1100 °С. В результате высоких температур после испытания образец подвергался короблению (рис. 9, б).

При больших скоростях скольжения, а также в режиме фрикционного торможения ракетных тележек температуры поверхностей трения достигают температуры плавления скользящих элементов из стали [19, 20].

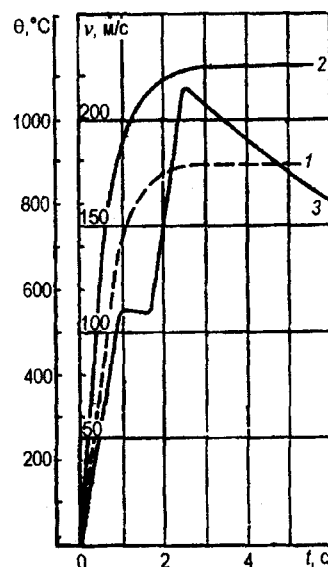


Рис. 8. Зависимость температуры (1, 2) и скорости скольжения (3) от времени: 1 — температура у задней кромки образца; 2 — у передней кромки образца

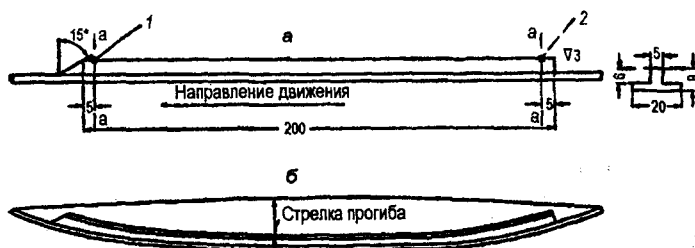


Рис. 9. Геометрическая форма образца до (а) и после испытания (б), схема установки термопар (в): 1, 2 — точки измерения температуры

**Заключение.** Анализ методов измерений температур при трении: метод естественных, искусственных термопар и комбинированный метод, показал, что измерение температуры трения с помощью естественной термопары дает заниженные результаты. Большие трудности возникают при

градуировке таких термопар, а также в связи с необходимостью уменьшения электрических помех от ЭДС самоиндукции [11,12]. Оригинальными являются измерения температуры поверхности трения вращающегося диска сразу же за образцом [11] на основе использования радиационного метода. При проведении стендовых и натурных испытаний широко применяется метод искусственных термопар. Особого внимания заслуживает метод измерения температур с использованием датчика (рис. 4), который позволяет использовать малоинерционные микротермопары с диаметром термоэлектродов  $0,02 \div 0,05$  мм. Такой датчик целесообразно применять при исследованиях тепловых процессов в условиях быстротекущих и кратковременных процессов трения ( $0,001 \div 1,000$  с).

### Обозначения

$d$  — диаметр образца;  $\omega$  — угловая скорость вращения контртела;  $v$  — скорость относительного скольжения;  $p_a$  — удельная нагрузка на номинальную площадь касания;  $\Delta$  — глубина установки термопары в тормозном барабане тормозного колеса самолета;  $\theta$ ,  $\Delta\theta$  — температура и ее изменение;  $L$  — длина трассы.

### Литература

1. Балакин В. А., Переверзева О. В. Метрологические основы измерений нестационарных температурных полей при трении // Трение и износ. — 1993 (14), № 6, 1072—1081
2. Богданович П. Н., Прушак В. Я. Трение и износ в машинах. — Минск: Вышэйшая школа. — 1999
3. Балакин В. А., Сергиенко В. П. Тепловые расчеты тормозов и узлов трения. — Гомель: ИММС НАНБ. — 1999
4. Серегин С. А., Люленков В. И. Температура контактной поверхности при трении металлов // Тепловая динамика трения. — М.: Наука. — 1970, 122—126
5. Балакин В. А., Синюк Н. И. Измерение температур в приповерхностном слое элемента пары трения с помощью микротермопар // Трение и износ. — 1986 (7), № 5, 931—934
6. Balakin V. A. Formation and distribution of heat in the frictional contact zone under conditions of non-stationary heat exchange // Wear. — 1981 (72), N 2, 133—141
7. Балакин В. А. Исследование процессов теплообмена и тепломассопереноса на границе контакта двух тел при трении // ИФЖ. — 1981 (13), № 6, 1083—1089
8. Балакин В. А. Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний триботехнических свойств материалов при высоких скоростях скольжения. Методические рекомендации МР 219-86. — М.: Госстандарт СССР. — 1986
9. Айнбиндер С. Б., Дзенис А. А., Тюнина Э. Л. Расчет температуры металл-полимерной пары при тяжелых режимах трения // Механика полимеров. — 1978, № 4, 666—669
10. Полосаткин Г. Д., Грибанов С. А. Измерение температуры на поверхности резца при скоростях 1—800 м/с // Известия ВУЗов, Физика. — 1965, № 3, 173—174
11. Carignan F. J., Rabinowicz E. Friction and wear at high sliding speeds // ASLE Transactions. — 1980 (24), N 4, 451—459
12. Мамхегов М. А., Гинзбург А. Г., Чичинадзе А. В. К вопросу экспериментального определения температуры при трении скольжения твердых тел // Теория и практика расчетов деталей машин на износ. — М.: Наука. — 1983, 82—84
13. Nittel J. Reibungstemperaturmessung mit natürlichen Thermoelementen bei metallischer Festkörper- und Mischreibung // Schmierungstechnik. — 1982 (13), N 12, 371—373
14. Чупилко Г. Е. Температура нагрева тормозного авиаколеса в процессе торможения и последующего остывания // Сухое и граничное трение. Фрикционные материалы // Труды III Всесоюз. конф. по трению и износу в машинах. Т. II. — М.: АН СССР. — 1960
15. Пыжевич Л. М. Расчет фрикционных тормозов. — М.: Машиностроение. — 1964
16. ГОСТ 23.210—80. Обеспечение износостойкости изделий. Метод оценки фрикционной теплостойкости материалов

17. Костерин Ю. Н. Некоторые методические вопросы испытаний автомобильных тормозных накладок // Расчет и испытания фрикционных пар. — М.: Машиностроение. — 1974
18. Горюнов В. М. Исследование трения при нестационарном высокоскоростном режиме // Новое в теории трения. — М.: Наука. — 1966, 91—97
19. Балакин В. А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения. — М.: Машиностроение. — 1980
20. Балакин В. А., Переверзева О. В. Проблемы трения и износа на ракетных треках // Трение и износ. — 1991 (12), № 3, 540—551

*Поступила в редакцию 07.02.03.*

Lysenok Yu.V., Balakin V.A. *Experimental study of temperatures in heavily loaded friction units.*

Experimental methods of temperature measurements in the zone of friction contact of brakes of railway rolling stock, subway, aircraft, rocket track bogies have been analyzed and validated by inertia tests of specimens.