

УДК 621.7; 621.8; 539.4

Б. И. БУТАКОВ¹, Д. Д. МАРЧЕНКО²

¹Николаевский политехнический институт, Украина

²Николаевский национальный аграрный университет, Украина

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ ОБКАТАННЫХ РОЛИКАМИ ОБРАЗЦОВ ПРИ КАЧЕНИИ С УЧЕТОМ ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ

Исследованы трибологические характеристики обкатанных роликами образцов при моделировании пары трения «канатный блок – канат» и установлены закономерности процесса изнашивания трибосопряжения при качении с учетом проскальзывания.

Ключевые слова: пара трения, проскальзывание, качение, смятие, коэффициент трения, обкатывание роликом.

Вступление. При контактном взаимодействии тел на состояние поверхностей трения влияют много факторов, которые следует учитывать при оценке параметров трибосистемы с целью выявления процессов и механизмов изнашивания. Основными факторами из них являются: физико-механические свойства материалов и их взаимодействие (твердость, структура, давление и др.), геометрические параметры контактирования поверхностей трения (отклонение от формы, шероховатость), которые определяют скорость скольжения, фрикционное поведение пары трения и др., а также окружающая среда поверхностей трения (температура, влажность, наличие смазки и др.). Поэтому, установление закономерностей изнашивания в процессе качения с учетом проскальзывания является актуальной задачей с целью повышения долговечности триботехнических характеристик контактирующих поверхностей, таких как пара трения «канатный блок – канат».

Методика исследований. Для определения скорости изнашивания при проскальзывании был усовершенствован способ определения скорости изнашивания при переменной площади контакта и соответственно при переменном контактном давлении, – так называемый метод лунок. В этом методе изменение площади трибоконтakta достигается за счет образования лунки изнашивания с помощью вращающегося диска или цилиндра на поверхности образца. Метод лунок используется в машинах Шпинделя, Конвисарова, Шкоды-Савина стандартах ASTM G77 – 91, G83 – 90 и др. Обычно при испытании этим методом оценка износостойкости выполняется по изменению объема, площади или длины хорды лунок изнашивания, полученному за определенное время. Это не давало возможности сравнивать износостойкость материалов, определяемую на машинах с разными размерами диска и формой образца.

В процессе роста лунки увеличивается площадь трения и снижается скорость изнашивания. Сравнивая мгновенные контактные давления и скорости изнашивания получим кривую зависимости скорости изнашивания от давления [1].

Для измерения глубины лунки необходимо высокоточное дорожное оборудование, которое автоматически учитывает изменения, внесенные нагреванием, биением, изменением шероховатости, изнашиванием диска. Для измерения длины лунки во многих случаях достаточна точность 0,1 мм, потому такие испытания могут быть проведены практически на любой машине трения. Для расчета скорости изнашивания и построения графиков зависимости скорости изнашивания

ния от давления исходной зависимости длины лунки от пути трения или числа оборотов была составлена методика исследований.

Для испытаний с целью определения триботехнических характеристик использовали трибометр TRB – S – DE (рис. 1), с помощью которого измеряли такие параметры, как коэффициент трения с точностью (0,01), силу трения, профилограмму следа трения, а также проводили непрерывное измерение глубины изнашивания (профиля следа) в режиме сухого трения и в присутствии смазочных материалов с автоматическим расчетом скорости изнашивания рабочего элемента трибометра и образца трибосопряжения «диск – сфера».

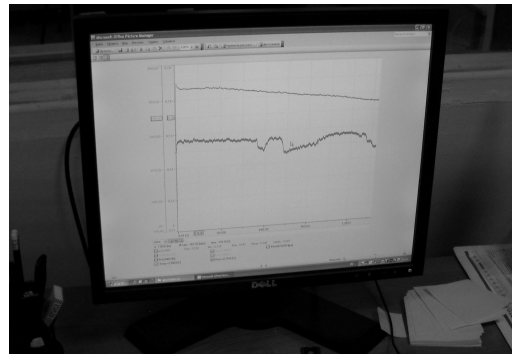


Рис. 1. Внешний вид трибометра TRB – S – DE

Степень изнашивания образцов (рис. 2, *а*) рассчитывалась с помощью программного обеспечения трибометра, исходя из объема материала, потерянного во время проведения исследований с графическим отображением результатов (рис. 2, *б*).



а



б

Рис. 2. Внешний вид образцов для испытаний (*а*) и графическое отображение результатов исследований трибометра TRB – S – DE (*б*)

Особенность данного прибора заключается в том, что штифт, сфера или плоская поверхность рабочего элемента трибометра прикладываются к поверхности исследуемого образца с необходимой нагрузкой, углом и во время испытаний определяется коэффициент трения за счет прогиба упругого рычага трибометра, причем величина усилия очень точно измерена. Вертикальное перемещение рычага трибометра TRB – S – DE, которое контролируется специальным чувствительным датчиком, при проведении испытаний непосредственно связано с глубиной изнашивания поверхности контакта. Кроме того, контроль таких па-

раметров испытаний, как скорость качения и скольжения, частота, контактное нагружение (контактные напряжения по Герцу), а также параметров времени и окружающей среды (температура, влажность и наличие или отсутствие смазки) позволяют моделировать реальные рабочие условия с наработкой информации по изнашиванию материала в реальном масштабе времени. Испытания проводились в соответствии с требованиями DIN 50324, ASTM G99 «Standard Test Method for wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus», а также стандарты ASTM G 133, ASTM D 3702, ASTM D 5183, ASTM D 4172 и ASTM D 2266.

Испытания с постоянным моментом трения имеют при этом некоторое преимущество перед испытаниями с постоянным проскальзыванием: во-первых, при испытаниях с постоянным моментом изменение диаметра образцов мало отражается на проскальзывании, во-вторых, снижение коэффициента трения в них при изменении внешних условий автоматически компенсируется увеличением проскальзывания и обеспечивает более стабильную величину скорости изнашивания, чем при испытаниях, в которых поддерживается постоянным проскальзывание: увеличение влажности или загрязнение воздуха в последнем случае вызывает снижение коэффициента трения и соответственно уменьшения скорости изнашивания [2].

Для испытания образцов при качении с проскальзыванием были проведены исследования на машине изнашивания МИ, верхний вал которой имел возможность поворачиваться, и был повернут вокруг вертикальной оси на угол 5° , что обеспечило поперечное проскальзывание около 10 %, которое наблюдается в паре трения «канатный блок – канат». Для измерения весового изнашивания образцов использовались весы ВЛР – 200.

Результаты исследований. При работе пары трения «канатный блок – канат» в результате страгивания и торможения возникает продольное проскальзывание, которое в несколько раз превышает поперечное проскальзывание.

Контактно-усталостная повреждаемость материала при контактном взаимодействии в реальных трибосистемах может не только не снижаться с увеличением сил трения и соответственно, эквивалентных напряжений, но может еще и увеличиваться. Повреждаемость при контактной усталости зависит в большей мере не только от исходного напряженно-деформированного состояния контакта и усредненного напряженно-деформированного состояния, которое достигается к моменту зарождения трещины контактной усталости, а от неоднородности пластического деформирования, которая создается к моменту зарождения контактно-усталостных повреждений, то есть от неоднородности поля остаточных напряжений, которое создается в процессе контактной усталости к моменту достижения предельного наклепа [3; 4].

Скорость вращения роликов не оказывает влияния на результаты определения предела контактно-усталостной выносливости. При качении с продольным проскальзыванием опережающий и отстающий ролики имеют разную величину проскальзывания.

Так же играет большую роль механизм проскальзывания при внутреннем или внешнем качении, так как контактные давления в этом случае не определяются по формуле Герца (при внутреннем качении), тогда может быть использован метод эквивалентной податливости. Также сложность проявляется в кинематике качения с потерей равновесия в касательном направлении [5].

В процессе изнашивания увеличивается размер лунки и растет площадь поверхности трения на верхнем неподвижном ролике, снижаются контактные давления и соответственно скорость изнашивания. Коэффициент трения при переходе от заедания к пластическому сглаживанию микронеровностей, а потом к окислительному изнашиванию изменяется очень незначительно, поэтому критические давления определялись по моменту резкого снижения скорости изнашивания.

При испытании на машине трения МИ стальных образцов из сталей 20, 25Л, 35Л обкатанных роликами, поверхностная твердость $HV 10$ которых составляла 235...272, была определена зависимость изнашивания от проскальзывания при разной нагрузке (рис. 3).

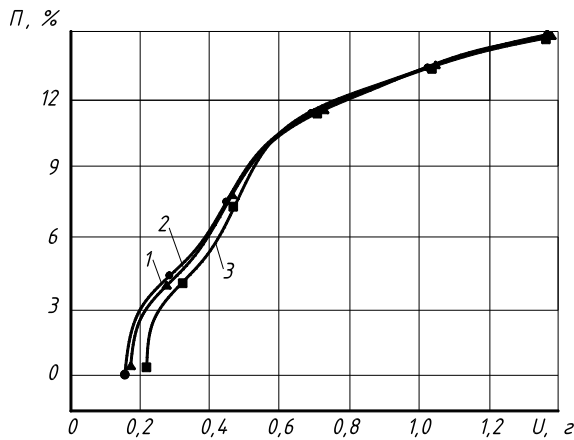


Рис. 3. Зависимость изнашивания от проскальзывания при нагрузке:
1 – 350 Н; 2 – 500 Н; 3 – 650 Н

Установлено, что изнашивание фактически незначительно зависит от нагрузки, а больше зависит от проскальзывания.

В случае качения с продольным проскальзыванием, равным 10 %, поверхности трения приобретают бурый окрас, характерный для окислительного изнашивания. При поперечном проскальзывании поверхностный слой в результате бокового пластичного течения непрерывно обновляется. При продольном проскальзывании участки поверхности и продукты изнашивания, перемещаясь вдоль окружности качения, многократно взаимодействуют, увеличивая роль коррозии в процессе изнашивания. Скорость окислительного изнашивания мало зависит от твердости стали, поэтому влияние твердости на результаты опытов при продольном проскальзывании нивелируется, это нужно учитывать при анализе результатов полученных на машине изнашивания МИ.

Для этого была определена зависимость скорости изнашивания от давления в контакте при моделировании проскальзывания до 10 % с помощью образцов из стали 35Л обкатанных роликом, поверхностная твердость $HV 10$ которых составляла 232 (рис. 4).

Следовательно, можно утверждать, что при проскальзывании до 10 % скорость изнашивания практически не зависит от давления или даже снижается при его повышении.

При изменении условий работы трибосистемы скорость изнашивания может изменяться скачком, при этом изменяется вид поверхности трения, размеры, цвет, химический состав продуктов трения, это является результатом перехода от одного механизма изнашивания к другому.

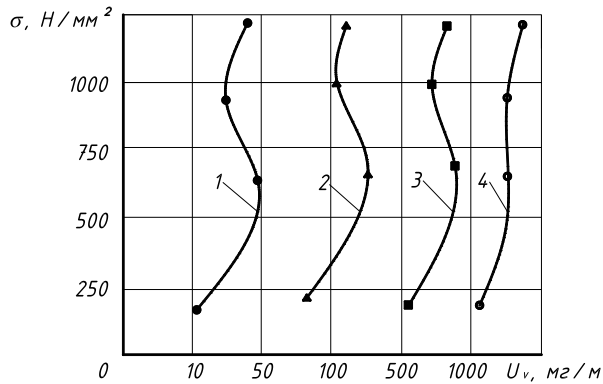


Рис. 4. Зависимость скорости изнашивания от давления в контакте образцов из стали 35J, обкатанных роликом при моделировании проскальзывания: 1 – 2,5 %; 2 – 5 %; 3 – 7,5 %; 4 – 10 %

Предельные слои тел, или поверхностные пленки, при их контакте в процессе качения с проскальзыванием снижают коэффициент трения до 3 – 4 раз и тем самым скорость и интенсивность изнашивания. Поэтому, с помощью изменения коэффициента трения возможно установить вид процесса или характер истирания поверхностных пленок.

Исследование зависимости коэффициента трения от количества оборотов образцов из стали 34XН1М проведено с моделированием проскальзывания до 10 %, при нагрузке 600 Н. При этом подвергали испытанию образцы до обкатывания, поверхностная твердость HV_{10} которых составляла 366, и после обкатывания роликом с усилием 12 кН, поверхностная твердость HV_{10} – 405 (рис. 5). Смазывание образцов проводилось при помощи масла БОЗ – 1.

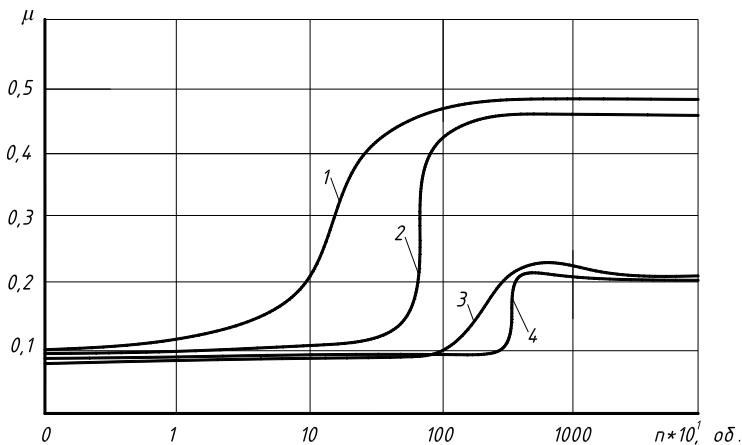


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения от количества оборотов образцов из стали 34XН1М с проскальзыванием до 10 %: 1 – необкатанный образец, без смазки; 2 – обкатанный роликом образец, без смазки; 3 – необкатанный образец, со смазкой; 4 – обкатанный роликом образец, со смазкой

Проведенные эксперименты показали, что при количестве оборотов к началу резкого изменения коэффициента трения поверхностная пленка равномерно распределена, этим объясняется устойчивое значение коэффициента трения, которое составляло около 0,1. При достижении определенного количества оборотов для двух образцов без смазки ($0,9 \cdot 10^1$ об. – для не обкатанного образца и

$50 \cdot 10^1$ об. – для образца, обкатанного роликом) предельные слои тел начинают терять свои свойства, происходит многократное изменение защитных свойств поверхностного слоя, из-за чего происходит резкое изменение коэффициента трения. Следует отметить, что для образца, обкатанного роликом, это изменение происходит быстрее, то есть образец быстро прирабатывается, после чего устанавливается постоянный коэффициент трения, поскольку происходит равновесие всех процессов (термических, физико-механических, химических), а на поверхности трения образуются новые поверхностные слои, которые в дальнейшем определяют механизм изнашивания. При этом коэффициент трения составляет приблизительно для двух образцов без смазки 0,45...0,48, а со смазкой 0,2...0,21 и происходит вторичное образование поверхностной пленки с интенсивным отделением продуктов изнашивания. Обкатывание роликами, которое создает сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое, привело к уменьшенному отрыву частиц от поверхности, уменьшая таким образом изнашивание [6; 7]. Такие же данные получены при испытании упрочненных обкатыванием образцов на машине ГЗИП по методу Шкоды-Савина, а также при испытании обкатанных образцов из стали 45, вырезанных из вала, испытание которых проводилось на изнашивание по Шпинделю. В соответствии с результатами этих экспериментов можно утверждать, что сжимающие остаточные напряжения, которые возникают при обкатывании роликами тормозят процесс изнашивания [8].

Зависимость коэффициента трения от величины проскальзывания проводилась на образцах до обкатывания и после обкатывания роликами при смазке поверхности трения и без смазки (рис. 6). В качестве смазки применяли Торсиол-55 (ГОСТ 20458-75), который применяется для смазки канатов, при скорости качения образцов 31,4 м/мин., выполненных из стали 35Л.

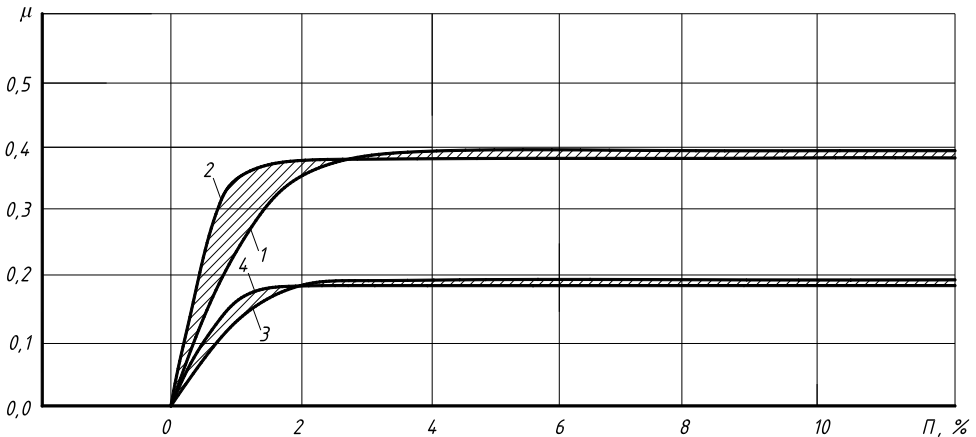


Рис. 6. Зависимость коэффициента трения от величины проскальзывания: 1 – необкатанный образец, без смазки; 2 – обкатанный роликом образец, без смазки; 3 – необкатанный образец, со смазкой; 4 – обкатанный роликом образец, со смазкой

Как видно из графика, при проскальзывании до 2 % прослеживается резкое изменение коэффициента трения, после чего он остается практически не измененным из-за распространения скольжения на всю площадь контакта. Очевидная связь величины максимального коэффициента трения от состояния поверхности трения, поскольку в процессе резкого изменения коэффициента трения для упрочненных и не упрочненных образцов со смазкой и без нее выявлена зона

(штрихованная линиями), когда приработка происходит быстрее для обкатанных образцов роликами (рис. 6), о чем можно утверждать, что шероховатость поверхности влияет только при малых проскальзываниях (до 3 %). Если проскальзывание будет составлять не больше 3 %, что наблюдается при работе пары трения «канатный блок – канат» в случае обкатывания блока роликом, не будет существенных повреждений поверхности их контакта, так как коэффициент трения будет иметь меньшее значение, чем в паре с необкатанным блоком.

Аналогичные результаты получены при испытании колесных пар [1]. Автором показано, что увеличение проскальзывания приводит к повышению наклепа поверхностного слоя, происходит уменьшение шероховатости поверхности и коэффициента трения, которое приводит к уменьшению смятия поверхности и таким образом к снижению изнашивания поверхностей. В нашем случае, с помощью обкатывания роликом [9 – 11], этот эффект достигается быстрее, при этом создаются в поверхностном слое заданные триботехнические свойства с уменьшенными показателями изнашивания.

На рис. 7 приведена зависимость коэффициента трения от шероховатости поверхности для образцов до обкатывания и после обкатывания роликом со смазкой маслом Торсиол-55.

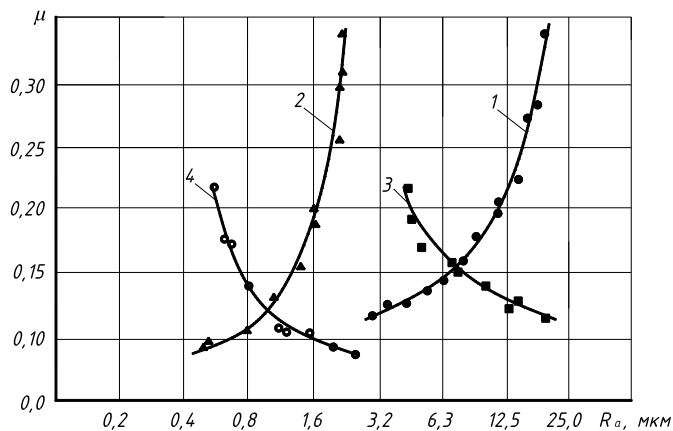


Рис. 7. Зависимость коэффициента трения от шероховатости поверхности:

1 – необкатанный образец, без смазки; 2 – обкатанный роликом образец, без смазки;
3 – необкатанный образец, со смазкой; 4 – обкатанный роликом образец, со смазкой

Из графика видно, что с уменьшением шероховатости поверхности уменьшается коэффициент трения для образцов, которые имеют смазку. Так, например, для образцов, обкатанных роликом, шероховатость поверхности R_a составляла 0,85...1,9 мкм, при смазке контактирующих поверхностей коэффициент трения составил 0,12...0,26.

Выводы:

1. При контактировании поверхностей с проскальзыванием менее чем 5 % изнашивание не зависит от твердости поверхностей, но при изменении твердости одной из поверхностей, следует учитывать повышенное изнашивание другой поверхности. Шероховатость поверхностей трения влияет на коэффициент трения и скорость изнашивания при качении с проскальзыванием, то есть с уменьшением шероховатости поверхности после обкатывания роликами уменьшается коэффициент трения при наличии смазки.

2. При проскальзывании до 2 % прослеживается резкое изменение коэффициента трения, после чего он остается практически не изменным из-за распространения скольжения на всю площадь контакта.

3. При качении с проскальзыванием основными механизмами изнашивания являются окислительное изнашивание и усталостное (смятие). Смятие увеличивается, при повышении проскальзывания, если касательные напряжения имеют достаточно большие значения.

Список литературы

1. Марков Д. П. Трибологические аспекты повышения износостойкости и контактно-усталостной выносливости колес подвижного состава: дис. ... доктора техн. наук : 05.02.04 / Марков Дмитрий Петрович. — М., 1996. — 386 с.
2. Буше Н. А. Совместимость трущихся поверхностей / Н. А. Буше, В. В. Копытько. — М. : Наука, 1981. — 128 с.
3. Попов А. П. Контактная задача напряженно-деформированного состояния тел при работе стального канатного блока и троса / А. П. Попов, Б. И. Бутаков, Д. Д. Марченко // Проблемы трибологии. — Хмельницький, 2011. — № 1. — С. 29—36.
4. Марченко Д. Д. Кінцево-елементне моделювання контактної взаємодії при роботі сталених канатного блоку і канату / Д. Д. Марченко // Проблеми трибології. — Хмельницький, 2013. — № 1. — С. 86—93.
5. Кузьменко А. Г. Закономерности проскальзывания при внутреннем и наружном качении цилиндров. Эксперимент (Часть 1) / А. Г. Кузьменко // Проблеми трибології. — Хмельницький, 2012. — № 2. — С. 121—126.
6. Бутаков Б. И. Повышение контактной прочности стальных деталей обкатыванием их роликами / Б. И. Бутаков, Д. Д. Марченко // Сучасні проблеми трибології : міжнар. наук.-техн. конф., 19-21 травня 2010 р. : тези доп. — К. : ІВЦ АЛКОН НАН України, 2010 — С. 74.
7. Бутаков Б. И. Разработка способа обкатывания роликами стальных деталей с целью повышения их контактной прочности / Б. И. Бутаков, Д. Д. Марченко // MOTROL. Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture Polish Academy of Sciences Branch of Lublin Ropczyce School of Engineering and Management. — Lublin, 2008. — Vol. 10B. — P. 15—28.
8. Школьник Л. М. Технология и приспособления для упрочнения и отделки деталей накатыванием / Л. М. Школьник, В. И. Шахов. — М. : Машиностроение, 1964. — 184 с.
9. Бутаков Б. И. Повышение контактной прочности стальных деталей с помощью поверхностного пластического деформирования / Б. И. Бутаков, Д. Д. Марченко // Проблемы трибологии. — Хмельницький, 2008. — № 1. — С. 14—23.
10. Исследование состояния поверхностного слоя валов обкатанных роликами / Б. И. Бутаков, Д. Д. Марченко, В. А. Артюх, А. В. Зубехина // Технологии упрочнения нанесения покрытий и ремонта: теория и практика : материалы 14-й междунар. науч.-практ. конф., 17 – 20 апреля 2012 г. : тезисы докл. : в 2 ч. — Санкт – Петербург, 2012. — Ч. 2. — С. 50—64.
11. Пат. 93252 Україна, МПК В 24 В 39/04. Спосіб чистової та зміцнюючої обробки поверхонь тіл обертання складного профілю і пристрій для його здійснення / Б. І. Бутаков, В. С. Шебанін, Г. С. Бутакова, Д. Д. Марченко ; заявник і патентовласник Миколаївський державний аграрний університет. – № а200815098 ; заявл. 29.12.2008 ; опубл. 12.07.2010, Бюл. № 13.

Б. І. БУТАКОВ, Д. Д. МАРЧЕНКО

ТРИБОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗНОШУВАННЯ ОБКАТАНИХ РОЛИКАМИ ЗРАЗКІВ ПРИ КОЧЕННІ З ВРАХУВАННЯМ ПРОКОВЗУВАННЯ

Досліджено трибологічні характеристики обкатаних роликами зразків при моделюванні пари тертя «канатний блок – канат» і встановлені закономірності процесу зношування трибоспряження при коченні з врахуванням проковзування.

Ключові слова: пара тертя, проковзування, кочення, зминання, коефіцієнт тертя, обкатування роликом.

B. I. BUTAKOV, D. D. MARCHENKO

TRIBOLOGICAL RESEARCH PROCESS WEAR RUN-SAMPLE MOVIES TAKING INTO ACCOUNT IN ROLLING SLIPPAGE

Tribological characteristics of run – rollers samples for modeling friction pair «rope pulley – rope» and the regularity of the wear process tribomating rolling considering slippage. It has been shown that a decrease in surface roughness after obkатыvaniya rollers reduce friction surfaces which are lubricated. When you slip up to 2 % observed a sharp change in the coefficient of friction, after which it remains almost flat due to the spread of the entire area of the sliding contact. The main mechanisms of wear rolling creep and fatigue is the oxidative (collapse) wear.

Keywords: pair of friction, slipping, wobbling, crumpling, coefficient of friction, rolling-off by a roller.

Бутаков Борис Иванович – д-р техн. наук, профессор, заведуючий кафедрой автомобилей и автомобильного хозяйства, Николаевский политехнический институт, г. Николаев, Украина, etcmtpr@yandex.ru.

Марченко Дмитрий Дмитриевич – ассистент кафедры транспортных технологий и технического сервиса, Николаевский национальный аграрный университет, г. Николаев, Украина, marchenko_vod@rambler.ru.