

УДК 621.771.06, 621.892

DOI 10.18698/0536-1044-2017-2-70-78

# Исследование условий формирования адсорбционного монослоя в линейном фрикционном контакте на поверхностях трения с использованием безабразивного смазочного материала\*

А.Н. Абрамов<sup>1</sup>, М.В. Харченко<sup>2</sup>, Р.Р. Дема<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», 450008, Уфа, Республика Башкортостан, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 12

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», 455000, Магнитогорск, Челябинская область, Российская Федерация, пр-т Ленина, д. 38

## The Study of Conditions for the Formation of an Adsorption Monolayer in the Linear Frictional Contact on Friction Surfaces Using a Non-Abrasive Lubricant

A.N. Abramov<sup>1</sup>, M.V. Kharchenko<sup>2</sup>, R.R. Dema<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ufa State Aviation Technical University, 450008, Ufa, Republic of Bashkortostan, K. Marx St., Bldg. 12

<sup>2</sup> Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Nosov Magnitogorsk State Technical University, 455000, Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 38

@ e-mail: kharchenko.mv@bk.ru, demarr78@mail.ru

**i** За последние десятилетия наука о трении получила большое развитие. Процессы трения и износа существенно зависят от конструктивного оформления узлов, подбора износостойких материалов и эффективных смазок для них, а также условий эксплуатации механизмов. В настоящее время одним из наиболее распространенных и эффективных способов достижения надежности и долговечности контактирующих деталей машин и механизмов является применение смазочного материала. Особый интерес представляет взаимодействие двух упругих тел, работающих при высоких ( $p_{cp} > 200$  МПа) нормальных контактных и касательных напряжениях, с учетом наличия в зоне контакта смазочного материала. Поэтому экспериментальные исследования, позволяющие наиболее точно (без учета дополнительных внешних воздействующих факторов) изучить влияние режимов подачи смазочного материала на характер контактного взаимодействия фрикционной пары и ее износостойкость являются актуальными.

**Ключевые слова:** момент трения, смазочный материал, выглаживание, изношенный объем.

**i** The science of friction has developed significantly in recent decades. The processes of friction and wear greatly depend on the unit design, selection of wear resistant materials and efficient lubricants for them, as well as the mechanism operating conditions. Currently, application of a

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-50108 мол\_нр.

lubricant is considered one of the most common and effective ways to ensure reliability and durability of the contact parts of machinery. Of particular interest, according to the authors, is the interaction between two elastic bodies operating at high ( $p_{avg} > 200$  MPa) normal and tangential contact stresses, with allowance for the presence of the lubricant in the contact area. Therefore, experimental studies where the effects of the lubricant supply modes on the nature of the contact interaction in the friction pair and its wear resistance can be determined most accurately (without additional external influencing factors) are very relevant.

**Keywords:** friction torque, lubricant materials, burnishing, worn volume.

Одной из характеристик, во многом определяющей характер контактного взаимодействия фрикционной пары, является состояние микрогеометрии их поверхностей, которая также влияет и на качество прокатываемого металла. В работе [1] отмечено, что оптимальная износостойкость валков наблюдается при такой шероховатости поверхности, которая возникает в процессе их эксплуатации, и независимо от исходной шероховатости поверхности ее чистота после приработки имеет постоянное значение. Поэтому, как указывает автор, необходимо создать оптимальные условия работы валков уже в начале их эксплуатации.

Цель работы — изучить влияния режимов подачи смазочного материала (СМ) на характер контактного взаимодействия фрикционной пары и ее износостойкость.

**Моделирование фрикционного взаимодействия пары трения на экспериментальной установке при наличии СМ в зоне контакта.**

Использование экспериментально-статистических методов и физического моделирования при исследовании процессов трения, изнашивания и смазки в машинах — эффективное направление решения задач надежности. Поэтому проведение испытаний на экспериментальной установке является дополнительным инструментом в изучении межвалкового контактного взаимодействия с использованием СМ, свойства которого приведены ниже.

В качестве объекта исследования принята модель взаимодействия двух упругих цилиндров. Широко известным контактным взаимодействием такого рода можно считать контакт рабочего и опорного валков клетки кварто непрерывного широкополосного прокатного стана.

**Свойства применяемого СМ**

Плотность при 20 °С, кг/м<sup>3</sup> . . . . . Не более 900  
 Кинематическая вязкость при 40 °С, мм<sup>2</sup>/с . . . . . 61–75  
 Кислотное число, мг КОН/г . . . . . Не более 0,05

Температура, °С:

вспышки в открытом тигле . . . . . Не менее 220  
 застывания . . . . . Не более –15

Стабильность против окисления:

приращение кислотного числа, мг КОН/г . . . . . Не более 0,4  
 приращение смол, % . . . . . Не более 3,0

Кинематика организации привода валков, полностью соответствующая приводу роликов экспериментальной установки, заключается в следующем:

- нижний ролик приводится в движение непосредственно от электродвигателя через шестеренный механизм;
- передаточное отношение шестеренного механизма  $u = 1$ ;
- верхний ролик приводится в движение за счет сил трения, возникающих от взаимодействия с нижним роликом, т. е. является «холостым».

Исследования проводили с использованием машины трения СМЦ-2, кинематическая схема которой приведена на рис. 1.

**Техническая характеристика машины СМЦ-2**

Частота вращения нижнего образца, с<sup>-1</sup> . . . . . 5,0; 8,33; 16,7  
 Момент трения, Н·м . . . . . 1,5...15,0  
 Нагрузка на образцы, кН . . . . . 0,2...2,0  
 Потребляемая мощность, кВт . . . . . 2,2  
 Масса машины, кг . . . . . 500

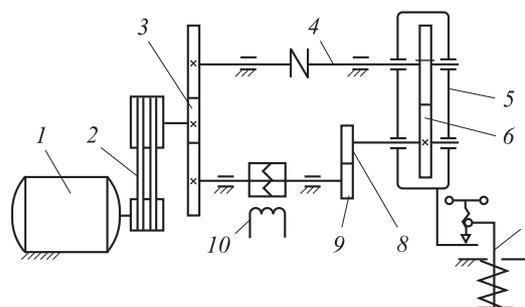


Рис. 1. Кинематическая схема машины трения СМЦ-2

Машина СМЦ-2 состоит из механической части и электронного блока управления и контроля. Основными узлами механической части являются электродвигатель 1, ременная передача 2, редуктор 3, муфта 4, откидная каретка 5, зубчатая передача 6, механизм нагружения 7, индуктивный датчик момента трения 10. На валах редуктора и зубчатой передачи установлены образец 8 и контртело 9. В блок управления и контроля входят кнопки «ПУСК» и «СТОП», электрический счетчик числа циклов и цифровой блок, регистрирующий изменение момента трения в процессе испытаний.

Внешнюю нагрузку создавали с помощью винтового механизма нагружения. Путь трения определяли на основе данных, снимаемых счетчиком числа оборотов. Момент трения измеряли с помощью бесконтактного индуктивного датчика по скручиванию вала, а его значения регистрировались с помощью электронно-вычислительного блока, состоящего из блока оцифровки входящих с индуктивного датчика сигналов и устройства вывода и обработки информации. Цифровой блок регистрировал четыре измерения в секунду.

Для того чтобы моделирование контактного взаимодействия фрикционной пары *рабочий валок — опорный валок* соответствовало экспериментальной установке, был выполнен подбор масштабных коэффициентов. При проведении исследований приняты следующие допущения:

- условия внешней (окружающей) среды эксплуатации и прокатных валков, и экспериментальной установки одинаковы;
- температурные расширения, возникающие в валках и пары роликов, отсутствуют;
- на основе ранее проведенных исследований теплового состояния прокатных валков [2, 3] было установлено, что температура межроликового контакта не превышает 95 °С;
- продольные оси валков и роликов параллельны.

**Подбор масштабных коэффициентов.** Известно [4], что коэффициент трения определяется выражением

$$f = \frac{2M_{\text{тр}}}{d_2 P}, \quad (1)$$

где  $M_{\text{тр}}$  — момент трения, Н·м;  $d_2$  — диаметр нижнего ролика, мм;  $P$  — нагрузка трибосопряжения, Н.

Используя основные положения задачи Герца и выражение (1) для обеспечения подобия режимов контактного взаимодействия рабочего и опорного валков и роликов экспериментальной установки, на основе применения второй теоремы теории подобия можно описать коэффициент трения зависимостью

$$f = \frac{4M_{\text{тр}}}{\pi d_2 P_{0\text{max}} b l}, \quad (2)$$

где  $P_{0\text{max}}$  — максимальное контактное напряжение, МПа;  $b$  — полуширина площадки контакта, мм;  $l$  — длина бочки опорного валка (верхнего ролика), мм.

Моделируемое контактное взаимодействие и контактное взаимодействие пары *рабочий валок — опорный валок* будут считаться подобными в том случае, если масштабные коэффициенты математических зависимостей будут равны единице.

С учетом зависимости (2) комбинация масштабных коэффициентов имеет вид

$$k_f f^1 = \frac{4k_{M_{\text{тр}}} M_{\text{тр}}^1}{\pi k_{d_2} d_2^1 k_{P_{0\text{max}}} P_{0\text{max}}^1 k_b b^1 k_l l^1}, \quad (3)$$

где  $k_f$ ,  $k_{M_{\text{тр}}}$ ,  $k_{d_2}$ ,  $k_{P_{0\text{max}}}$ ,  $k_b$  и  $k_l$  — масштабные коэффициенты параметров  $f$ ,  $M_{\text{тр}}$ ,  $d_2$ ,  $P_{0\text{max}}$  и  $l$  соответственно; индекс «1» указывает на характеристики объекта моделирования.

После преобразования выражения (3) получим

$$\frac{k_{M_{\text{тр}}}}{k_f k_{d_2} k_{P_{0\text{max}}} k_b k_l} = 1. \quad (4)$$

Используя индикатор подобия, можно определить масштабные коэффициенты, входящие в выражение (4):

$$k_{d_2} = \frac{d_2^2}{d_2^1} = 0,0407;$$

$$k_{P_{0\text{max}}} = \frac{P_{0\text{max}}^2}{P_{0\text{max}}^1} = 0,367;$$

$$k_b = \frac{b^2}{b^1} = 0,0149;$$

$$k_l = \frac{l^2}{l^1} = 0,00549;$$

$$k_{M_{\text{тр}}} = \frac{M_{\text{тр}}^2}{M_{\text{тр}}^1} = 2,542 \cdot 10^{-6},$$

где  $M_{\text{тр}}^1$  — был определен согласно методике, приведенной в работе [5]; индекс «2» указывает

на характеристики, регистрируемые моментом измерителем экспериментальной установки.

Тогда

$$k_f = \frac{k_{M_{тр}}}{k_{a_2} k_{P_{0max}} k_b k_l} = 2,064.$$

Используемый инструмент имел следующие параметры:

- диаметр верхних роликов в среднем — 65 мм;
- диаметр нижних роликов в среднем — 35 мм;
- ширина верхнего ролика — 10 мм;
- ширина нижнего ролика — 12 мм;
- частота вращения нижнего ролика — 500, 1 000 мин<sup>-1</sup>;
- верхний ролик — холостой;
- масса нижних и верхних роликов перед проведением экспериментов в среднем — 68 и 249 г соответственно;
- расход СМ — 0,0100...0,549 мл/мин;
- внешняя нагрузка — 300...900 Н.

Ролики экспериментальной установки изготовлены из валковых материалов: верхний — из стали 90ХФ, нижний — из чугуна марки ЛПХ17НМд в литейной лаборатории ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

Приведенные выше, средние значения не означают, что использовались результаты опытов, полученные на основе расчета средних параметров. В данном случае имеется в виду, что было изготовлено много моделей (роликов) и для каждого опыта применяли новую пару с параметрами, находящимися вблизи указанного среднего значения.

Экспериментальные исследования включали в себя следующие этапы:

- пуск электродвигателя лабораторной установки;
- работа лабораторной установки на холостом ходу без приложенной внешней нагрузки (происходит вращение только нижнего ролика);
- прижатие верхнего ролика на предварительную нагрузку, равную 100 Н;
- приложение внешней нагрузки;
- подача СМ.

Результаты проведенных исследований приведены на рис. 2 и в табл. 1.

На рис. 2 показано изменение момента трения  $M_{тр}$  во времени при различных значениях режимных параметров — внешней нагрузки  $P$  и расхода СМ  $Q$ . Из представленных на основе экспериментов графических зависимостей  $M_{тр}$  от времени предварительно можно сделать вывод о некоторой равномерности и устойчивости поведения этого параметра, без ярко выраженных локальных изменений при частоте вращения нижнего ролика  $n = 500$  мин<sup>-1</sup>. При  $n = 1 000$  мин<sup>-1</sup> такой равномерности не наблюдается. Кроме того, на этой частоте вращения при первом ( $P = 850$  Н,  $Q = 0,549$  мл/мин) и втором ( $P = 850$  Н,  $Q = 0,100$  мл/мин) режимах работы, соответствующих кривым 1 и 2, возникает резкий скачок момента трения, причем на кривой 2 он происходит гораздо позже, чем на кривой 1.

Такое изменение момента трения нуждается в дальнейшем изучении, и единственным на сегодняшний день нашим предположением, объясняющим этот факт, является работа самого СМ и термическое воздействие. Следовательно, при высокой частоте вращения и большой подаче СМ (первый режим) на поверхно-

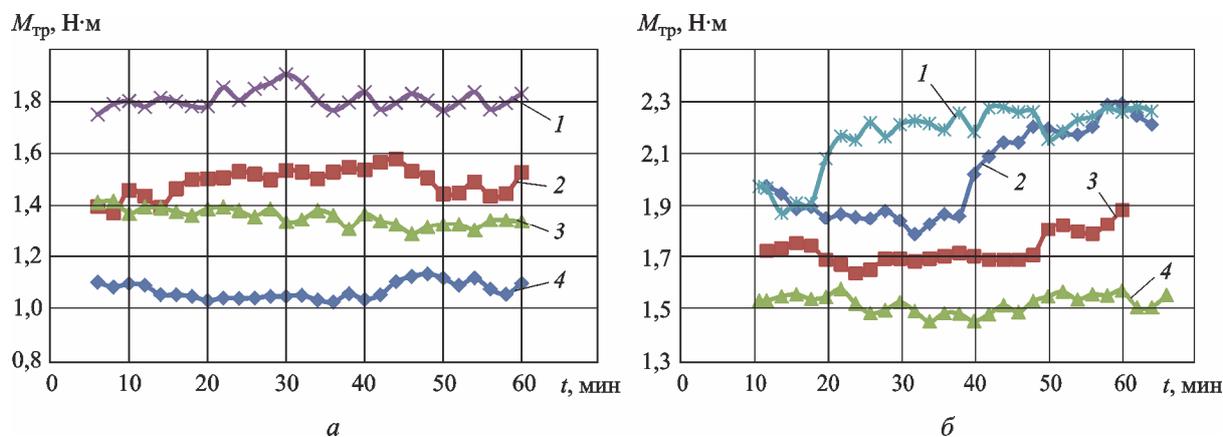


Рис. 2. Зависимости момента трения  $M_{тр}$  от времени  $t$  при частоте вращения  $n = 500$  (а) и 1 000 (б) мин<sup>-1</sup> для различных режимов работы:

- 1 —  $P = 850$  Н,  $Q = 0,549$  мл/мин; 2 —  $P = 850$  Н,  $Q = 0,100$  мл/мин; 3 —  $P = 290$  Н,  $Q = 0,549$  мл/мин; 4 —  $P = 290$  Н,  $Q = 0,100$  мл/мин

Таблица 1

## Результаты проведенных исследований

Нагрузка, Н	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Расход СМ, мл/мин	Момент трения, Н·м	Износ ролика, г	Температура ролика, °С
290	500	0,100	1,22445	0,49885/0,20355	48,65/42,80
850	500	0,100	1,44240	0,00520/0,00175	43,25/38,10
290	1 000	0,100	1,66685	0,14555/0,07015	63,00/54,70
850	1 000	0,100	1,90115	0,00690/0,00400	51,45/44,90
290	500	0,549	1,33930	0,00390/0,00540	43,90/40,60
850	500	0,549	1,65060	0,00765/0,00170	46,10/39,90
290	1 000	0,549	1,78805	0,52780/0,19065	69,45/61,65
850	1 000	0,549	1,92655	0,05350/0,01515	60,00/47,65

*Примечание.* В числителе дроби указаны значения для верхнего ролика, в знаменателе — для нижнего.

стях трения не образуется (или образуется, но на очень короткое время, пока температуры контактирующих тел не так высоки) антифрикционный адсорбционный монослой, а при высокой частоте вращения и малой подаче СМ (второй режим) антифрикционный адсорбционный монослой формируется и работает достаточно длительное время, но в итоге момент трения также резко повышается вследствие термического разрушения антифрикционного покрытия. Это предположение подтвердили замеры температуры, проведенные после экспериментов с помощью термопары (см. табл. 1).

Для оценки значения текущего износа нижнего ролика экспериментально-аналитическим путем определен энергетический показатель изнашивания (табл. 2) как отношение расчи-

танного объемного износа  $\Delta V$  к рассчитанной работе сил трения  $A_{тр}$  за время проведения эксперимента, в течение которого он потерял этот изношенный объем:

$$J^{эн} = \frac{\Delta V}{A_{тр}}$$

Работа силы трения на контактной поверхности ролика

$$A_{тр} = F_{тр} L_{тр},$$

где  $F_{тр}$  — сила трения в контакте, Н;  $L_{тр}$  — путь трения, м.

На основе результатов серии экспериментов можно выделить наиболее эффективные режимы взаимодействия роликов с позиции создания наилучших антифрикционных свойств.

Таблица 2

## Результаты расчетов энергетического показателя изнашивания

Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Путь трения, м	Момент трения, Н·м	Сила трения, Н	Работа силы трения, Дж	Объемный износ, мм <sup>3</sup>	Энергетический показатель изнашивания, мм <sup>3</sup> /Дж·10 <sup>-5</sup>
500	3 297	1,22445	290	956 130	25,929	2,711
500	3 297	1,4424	850	2 802 450	0,223	0,008
1 000	6 594	1,66685	290	1 912 260	8,936	0,467
1 000	6 594	1,90115	850	5 604 900	0,509	0,009
500	3 297	1,3393	290	956 130	0,687	0,071
500	3 297	1,6506	850	2 802 450	0,216	0,007
1 000	6 594	1,78805	290	1 912 260	24,286	1,270
1 000	6 594	1,92655	850	5 604 900	1,929	0,034

Наименьший износ верхнего ( $W = 0,00520$  г) и нижнего ( $W = 0,00175$  г) роликов соответствует опытам с малым расходом СМ ( $Q = 0,100$  мл/мин) и высокой нагрузкой ( $P = 850$  Н). При этом температура верхнего ( $T = 43,25$  °С) и нижнего ( $T = 38,10$  °С) роликов после окончания экспериментов так же, как и момент трения ( $M_{тр} = 1,4424$  Н·м) для такой нагрузки, являются наименьшими. Оценка рассчитанного энергетического показателя изнашивания подтверждает сделанные выводы.

По результатам измерений микротопографии поверхностей взаимодействующих тел в НИЦ «Микротопография» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», проведенных на современном оборудовании под руководством профессора В.К. Белова и ассистента Е.В. Губарева, установлено следующее:

1) минимальное значение шероховатости достигнуто при режимах с максимальными контактными нагрузками ( $Ra < 0,1$  мкм), что соответствует высокому классу чистоты поверхности, получаемой такими операциями металлообработки, как выглаживание [6–10]. Шероховатость поверхности  $Ra$  после проведения экспериментов измеряли с помощью контактного профилометра MarSurf XR20 with XT20 (Mahr, Германия) в продольном и поперечных направлениях у всех образцов;

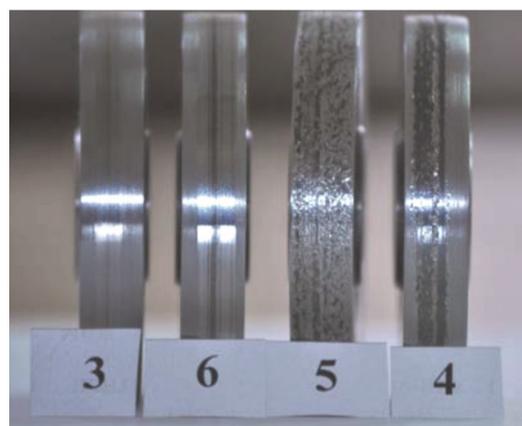
2) при исследовании образцов поверхностей этих же роликов на интерференционном микроскопе Contour GT K1 (фирма Bruker, США) после проведения испытаний обнаружен антифрикционный адсорбционный монослой (толщиной 40...60 нм), наличие которого подтверждает наши предположения.

Все это означает, что такой режим трения во фрикционной паре позволяет создать антифрикционный адсорбционный монослой, поверхность которого обладает чистотой высокого класса.

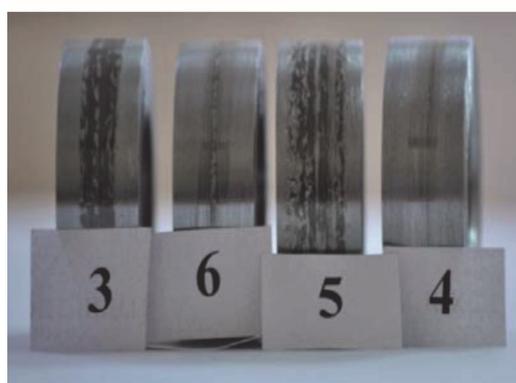
По результатам опыта получены следующие параметры:

- для верхнего ролика — износ  $W = 0,0013$  г; продольная шероховатость  $Ra = 0,057$  мкм; поперечная шероховатость  $Ra = 0,367$  мкм;
- для нижнего ролика — износ  $W = 0,0017$  г.

В качестве иллюстрированного дополнения к вышесказанному приведены фотографии роликов после проведения испытаний (рис. 3), на которых указаны их порядковые номера.



а



б

Рис. 3. Поверхности верхних (а) и нижних (б) роликов после проведения испытаний

В данном случае при  $n = 1000$  мин<sup>-1</sup> совместно работали следующие пары (верхний ролик/нижний ролик):

- 3/4 при  $P = 850$  Н,  $Q = 0,100$  мл/мин;
- 6/6 при  $P = 850$  Н,  $Q = 0,549$  мл/мин;
- 5/5 при  $P = 290$  Н,  $Q = 0,549$  мл/мин;
- 4/3 при  $P = 290$  Н,  $Q = 0,100$  мл/мин.

Представленные результаты нашли подтверждение в работах [5, 11–13], в которых отмечено, что первой стадией взаимодействия СМ с рабочими поверхностями контактирующих деталей является физическая адсорбция молекул СМ на этих поверхностях, а также в издании [13] указано, что адсорбционные слои обеспечивают достаточно эффективное смазывание при легких условиях работы узла трения. Адсорбционное пластифицирование тончайших поверхностных слоев контактирующих тел облегчает их приработку, выглаживание и, следовательно, снижает давление на фактической площади контакта.

## Выводы

1. В настоящее время рассмотрению условий контактного взаимодействия рабочего и опорного валков с использованием СМ посвящено большое количество публикаций [14–20]. Результаты проведенных экспериментальных исследований подтвердили существующее представление о формировании адсорбционного антифрикционного слоя на поверхностях контакта при легких режимах работы, к которым можно отнести период прокатки «мягких» сталей обыкновенного качества. С помощью экс-

периментальной установки были достигнуты режимы, при которых и произошла реализация адсорбционного смазывания.

2. Несмотря на то что исследования в этой области продолжаются и задача проведения промышленного эксперимента пока не решена, практическая ценность данной работы, по мнению авторов, уже определена: она заключается в использовании предложенного режима смазывания для уменьшения коэффициента трения в зоне контакта пары *рабочий валок — опорный валок*, который повысит энергоэффективность прокатки некоторых профилей.

## Литература

- [1] Полухин П.И., Николаев В.А., Полухин В.П. *Контактное взаимодействие металла и инструмента при прокатке*. Москва, Металлургия, 1974. 200 с.
- [2] Платов С.И., Дема Р.Р., Зубарева М.В., Ячиков И.М. Исследование теплового состояния прокатных валков с целью улучшения температурных условий их эксплуатации. *Моделирование и развитие процессов ОМД*, 2011, № 1, с. 25–30.
- [3] Ворожищев А.Н., Дема Р.Р. Управление температурным режимом работы валков широкополосного стана горячей прокатки. *Научный альманах*, 2016, № 1–1(15), с. 399–403.
- [4] Лукиенко Л.В., Сафонов Б.П., Лысюк А.А. *Лабораторный практикум по курсу «Основы трения и изнашивания элементов трибомеханических систем оборудования»*. Новомосковск, Новомосковский институт Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева, 2000. 25 с.
- [5] Бакли Д. *Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии*. Москва, Машиностроение, 1986. 360 с.
- [6] Малышева В.И. Анализ взаимосвязи плотности дислокаций с пластической деформацией поверхностного слоя при обычном ультразвуковом алмазном выглаживании. *Вектор науки ТГУ*, 2009, № 6, с. 7–11.
- [7] Бобровский И.Н. *Технология обработки деталей поверхностно-пластическим деформированием без применения смазочно-охлаждающих технических средств*. Самара, Самарский научный центр РАН, 2012. 142 с.
- [8] Kamble P.S., Jadhav V.S. *Experimental study of Roller burnishing process on plain carrier of planetary type gear box*. Maharashtra, India, 2012. 52 p.
- [9] Ghodake A.P., Rakhade R.D., Maheshwari A.S. *Effect of burnishing process on behavior of engineering materials*. Nasik, India, 2011. 65 p.
- [10] Gulhane U.D., Mishra S.B., Mishra P.K. *Enhancement of surface roughness of 316L stainless steel and Ti-6Al-4V using low plasticity burnishing*. Allahabad, India, 2011. 30 p.
- [11] Боуден Ф.Ф., Тейбор Д. *Трение и смазка*. Москва, Машгиз, 1960. 151 с.
- [12] Крагельский И.В., Алисин В.В., ред. *Трение, изнашивание и смазка. Справочник*. В 2 кн. Кн. 1. Москва, Машиностроение, 1978. с. 46–57.
- [13] Чичинадзе А.В., ред. *Трение, износ и смазка (трибология и триботехника)*. Москва, Машиностроение, 2003. 576 с.
- [14] Дема Р.Р., Харченко М.В., Горбунов А.А. Теоретическое исследование влияния режимов подачи смазочного материала на изменение энергозатрат при горячей прокатке на стане 2000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». *Производство проката*, 2013, № 2, с. 11–13.
- [15] Платов С.И., Амиров Р.Н., Дема Р.Р., Ярославцев А.В., Казаков И.В. Математическое моделирование процесса изнашивания рабочих валков клети кварто при подаче смазочного материала. *Горный журнал. Черные металлы*, 2012, № 3, специальный совместный выпуск, посвященный юбилею ОАО «ММК», с. 54–57.

- [16] Харченко М.В., Пелымская И.С. Оценка эффективности процесса горячей чистовой прокатки с использованием системы подачи технологической смазки. *Черная металлургия*, 2013, № 11, с. 46–50.
- [17] Амиров Р.Н., Дема Р.Р., Платов С.И., Мартынова У.Д., Ахметова К.К. Исследование и оценка загруженности главных приводов непрерывной группы клетей стана 2000 горячей прокатки в зависимости от сортамента выпускаемой продукции. *Производство проката*, 2014, № 2, с. 13–16.
- [18] Харченко М.В., Дема Р.Р., Ярославцев А.В. Разработка технологии подачи смазки при горячей прокатке на опорные валки для производства высокопрочных марок сталей. *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Сб. науч. тр.*, Магнитогорск, Магнит. гос. техн. ун-т. им. Г.И. Носова, 2010, т. 1, № 1, с. 307–310.
- [19] Грудев А.П. *Внешнее трение при прокатке*. Москва, Металлургия, 1973. 288 с.
- [20] Кнеппе G., Розенталь D. Hot strip rolling technology. Tasks for the new century. *MPT International*, 1998, no. 3(22), pp. 56–58, 60, 62, 64, 66, 67.

## References

- [1] Polukhin P.I., Nikolaev V.A., Polukhin V.P. *Kontaktное vzaimodeistvie metalla i instrumenta pri prokatke* [Contact interaction of metal and the tool during rolling]. Moscow, Metallurgiya publ., 1974. 200 p.
- [2] Platon S.I., Dema R.R., Zubareva M.V., Iachikov I.M. Issledovanie teplovogo sostoiianiia prokatnykh valkov s tsel'iu uluchsheniia temperaturnykh uslovii ikh ekspluatatsii [The study of the thermal state of rolls with the purpose of improving temperature conditions]. *Modelirovanie i razvitie protsessov OMD* [Modeling and development processes of metal forming]. 2011, no. 1, pp. 25–30.
- [3] Vorozhishchev A.N., Dema R.R. Upravlenie temperaturnym rezhimom raboty valkov shirokopolosnogo stana goriachei prokatki [Thermal management of the work of hot rolling mill rolls broadband]. *Nauchnyi al'manakh* [Science almanac]. 2016, no. 1–1(15), pp. 399–403.
- [4] Lukienko L.V., Safonov B.P., Lysiuk A.Ia. *Laboratornyi praktikum po kursu «Osnovy treniia i iznashivaniia elementov tribomekhanicheskikh sistem oborudovaniia»* [Laboratory workshop on the course «Fundamentals of friction and wear of elements in tribomechanical systems»]. Novomoskovsk, Rossiiskii khimiko-tekhnologicheskii universitet im. D.I. Mendeleeva Novomoskovskii institute publ., 2000. 25 p.
- [5] Bakli D. *Poverkhnostnye iavleniia pri adgezii i friktsionnom vzaimodeistvii* [Surface phenomena during adhesion and friction interaction]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1986. 360 p.
- [6] Malysheva V.I. Analiz vzaimosviasi plotnosti dislokatsii s plasticheskoi deformatsiei poverkhnostnogo sloia pri obychnom ul'trazvukovom almaznom vyglazhivaniia [The analysis of interrelation of density of dispositions with plastic deformation of the blanket at usual and ultrasonic superficial plastic deformation]. *Vektor nauki TGU* [Vector science TSU]. 2009, no. 6, pp. 7–11.
- [7] Bobrovskii I.N. *Tekhnologiia obrabotki detalei poverkhnostno-plasticheskim deformirovaniem bez primeneniia smazочно-okhlazhdaiushchikh tekhnicheskikh sredstv* [Technology of processing of details by surface plastic deformation without the use of lubricating-cooling technological means]. Samarskii nauchnyi tsentr RAN publ., 2012. 142 p.
- [8] Kamble P.S., Jadhav V.S. *Experimental study of Roller burnishing process on plain carrier of planetary type gear box*. Maharashtra, India, 2012. 52 p.
- [9] Ghodake A.P., Rakhade R.D., Maheshwari A.S. *Effect of burnishing process on behavior of engineering materials*. Nasik, India, 2011. 65 p.
- [10] Gulhane U.D., Mishra S.B., Mishra P.K. *Enhancement of surface roughness of 316L stainless steel and Ti-6Al-4V using low plasticity burnishing*. Allahabad, India, 2011. 30 p.
- [11] Bouden F.F., Teibor D. *Trenie i smazka* [Friction and lubrication]. Moscow, Mashgiz publ., 1960. 151 p.
- [12] *Trenie, iznashivanie i smazka. Spravochnik* [Friction, wear and lubrication. Reference]. B. 1. Ed. Kragel'skii I.V., Alisin V.V. Moscow, Mashinostroenie publ., 1978. pp. 46–57.
- [13] *Trenie, iznos i smazka (tribologiia i tribotekhnika)* [Friction, wear and lubrication (tribology and triboengineering)]. Ed. Chichinadze A.V. Moscow, Mashinostroenie publ., 2003. 576 p.

- [14] Dema R.R., Kharchenko M.V., Gorbunov A.A. Teoreticheskoe issledovanie vliianiia rezhimov podachi smazochnogo materiala na izmenenie energozatrat pri goriachei prokatke na stane 2000 OAO «Magnitogorskii metallurgicheskii kombinat» [Theoretical investigation of lubricant supply conditions' effect on energy power consumption change when hot rolling on mill 2000 at JSC «Magnitogorskii metallurgical plant»]. *Proizvodstvo prokata* [Rolled Products Manufacturing]. 2013, no. 2, pp. 11–13.
- [15] Platov S.I., Amirov R.N., Dema R.R., Iaroslavtsev A.V., Kazakov I.V. Matematicheskoe modelirovanie protsessa iznashivaniia rabochikh valkov kleti kvarto pri podache smazochnogo materiala. *Gornyi zhurnal. Chernye metally* [Stahl und Eisen]. 2012, vol. 3, spec. joint issue dedicated to the anniversary of OJSC «MMK», pp. 54–57.
- [16] Kharchenko M.V., Pelymskaia I.S. Otsenka effektivnosti protsessa goriachei chistovoi prokatki s ispol'zovaniem sistemy podachi tekhnologicheskoi smazki [Evaluation of efficiency of process of hot finish rolling with the use of the feed system of the technological lubricant]. *Chernaia metallurgiiia* [Ferrous metallurgy]. 2013, no. 11, pp. 46–50.
- [17] Amirov R.N., Dema R.R., Platov S.I., Martynova U.D., Akhmetova K.K. Issledovanie i otsenka zagruzhennosti glavnykh privodov nepreryvnoi gruppy kletei stana 2000 goriachei prokatki v zavisimosti ot sortamenta vypuskaemoi produktsii [Study and evaluation of workload of main drives of continuous stands' group of 2000 hot rolling mill, depending on product mix]. *Proizvodstvo prokata* [Rolled Products Manufacturing]. 2014, no. 2, pp. 13–16.
- [18] Kharchenko M.V., Dema R.R., Iaroslavtsev A.V. Razrabotka tekhnologii podachi smazki pri goriachei prokatke na opornye valki dlia proizvodstva vysokoprochnykh marok stalei [Development of technology of lubrication during hot rolling on the supporting rolls for the production of high-strength steels.]. *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniia: sb. nauch. tr.* [Actual problems of modern science, technology and education: collection of scientific papers]. Magnitogorsk, Magnit. gos. tekhn. un-t. im. G.I. Nosova publ., 2010, vol. 1, no. 1, pp. 307–310.
- [19] Grudev A.P. *Vneshnee trenie pri prokatke* [External friction during rolling]. Moscow, Metallurgiiia publ., 1973. 288 p.
- [20] Knepe G., Rozenhal D. Hot strip rolling technology. Tasks for the new century. *MPT International*, 1998, no. 3 (22), pp. 56–58, 60, 62, 64, 66, 67.

Статья поступила в редакцию 24.10.2016

## Информация об авторах

**АБРАМОВ Алексей Николаевич** (Уфа) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Нанотехнологии». ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (450008, Уфа, Республика Башкортостан, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 12).

**ХАРЧЕНКО Максим Викторович** (Магнитогорск) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика». ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (455000, Магнитогорск, Челябинская область, Российская Федерация, пр-т Ленина, д. 38, e-mail: kharchenko.mv@bk.ru).

**ДЕМА Роман Рафаэлевич** (Магнитогорск) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и технология обработки давлением и машиностроения». ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (455000, Магнитогорск, Челябинская область, Российская Федерация, пр-т Ленина, д. 38, e-mail: demarr78@mail.ru).

## Information about the authors

**ABRAMOV Aleksey Nikolaevich** (Ufa) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Nanotechnology Department. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ufa State Aviation Technical University (450008, Ufa, Republic of Bashkortostan, K. Marx St., Bldg. 12).

**KHARCHENKO Maksim Viktorovich** (Magnitogorsk) — Candidate of Science, Associate Professor, Department of Mechanics. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Nosov Magnitogorsk State Technical University (455000, Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 38, e-mail: kharchenko.mv@bk.ru).

**DEMA Roman Rafaelevich** (Magnitogorsk) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Metal Forming Machines and Technology. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Nosov Magnitogorsk State Technical University (455000, Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russian Federation, Lenin Ave., Bldg. 38, e-mail: demarr78@mail.ru).