



УДК 621.891

DOI 10.17073/0368-0797-2025-3-259-265



Оригинальная статья

Original article

ОСОБЕННОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ ПРИ СКОЛЬЖЕНИИ ПОД НИЗКИМ КОНТАКТНЫМ ДАВЛЕНИЕМ

М. И. Алеутдинова , В. В. Фадин

Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/4)

✉ aleut@ispms.ru

Аннотация. В данной работе сухое скольжение образцов стали Ст3 по контртелу (сталь 45) осуществлялось по схеме сопряжения «pin-on-ring» (типа вал–колодка) при скоростях скольжения 0,75 – 8,0 м/с под контактным давлением 0,13 МПа. Необходимость проведения такого эксперимента обоснована отсутствием ориентировочных данных о триботехническом поведении стали в скользящем контакте по стали при отсутствии продуктов окисления в контактном пространстве. Температура держателя образца не превышает 35 °С при всех скоростях скольжения. Это позволяет сделать допущение об отсутствии продуктов окисления на поверхностях контакта. Образование слоя переноса визуально наблюдается при скольжении только с малыми скоростями: 0,75 – 1,3 м/с. Коэффициент трения снижается в течение времени образования слоя переноса и принимает конечное значение около 0,4. Поверхности скольжения образцов содержат признаки адгезионного взаимодействия при всех скоростях скольжения. Особенно отчетливо адгезия наблюдается на поверхности скольжения образца при скорости скольжения 2,5 м/с. Коэффициент трения при этой скорости скольжения имеет значительные колебания около значения $0,8 \pm 0,1$. Одновременно наблюдается высокая интенсивность изнашивания. Зависимость интенсивности изнашивания от скорости скольжения максимальна при скорости скольжения 2,5 м/с. Самая низкая интенсивность изнашивания наблюдается при скорости скольжения 5,0 м/с и при коэффициенте трения около $0,7 \pm 0,05$. Низкая амплитуда колебаний коэффициента трения ($0,7 \pm 0,03$) наблюдается при скольжении со скоростью 8,0 м/с. Рентгеновский фазовый анализ показал, что контактные слои образцов при всех скоростях скольжения имеют только фазу α -Fe с параметром решетки около 0,287 нм.

Ключевые слова: скользящий металлический контакт, интенсивность изнашивания, адгезия, окисление, коэффициент трения, температура держателя образца, фазовый состав контактного слоя

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, тема номер FWRW-2021-0006.

Для цитирования: Алеутдинова М.И., Фадин В.В. Особенности изнашивания контактной поверхности стали при скольжении под низким контактным давлением. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2025;68(3):259–265. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-3-259-265>

FEATURES OF STEEL CONTACT SURFACE WEAR IN SLIDING UNDER LOW CONTACT PRESSURE

M. I. Aleutdinova , V. V. Fadin

Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/4 Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

✉ aleut@ispms.ru

Abstract. The C235 steel samples were dry-slid along the counterbody (C45 steel) according to the pin-on-ring configuration scheme (shaft-pad type) at sliding speeds of 0.75 – 8.0 m/s under a contact pressure of 0.13 MPa. The need for such an experiment is justified by the lack of indicative data on the tribotechnical behavior of steel in sliding contact with steel in the absence of oxidation products in the contact space. Temperature of the sample holder does not exceed 35 °C at all sliding speeds. This allows us to assume that there are no oxidation products on the contact surfaces. Formation of the transfer layer is visually observed in sliding only at low speeds: 0.75 – 1.3 m/s. The friction coefficient decreases during the formation time of the transfer layer and reaches a final value of about 0.4. The sliding surfaces of the samples contain signs of adhesive interaction at all sliding speeds. Adhesion is particularly pronounced on the sliding surface of the sample at a sliding speed of 2.5 m/s. The friction coefficient at this sliding speed has significant fluctuations around 0.8 ± 0.1 . At the same time, there is a high rate of wear. Dependence of wear intensity on the sliding speed has maximum at a sliding speed of 2.5 m/s. The lowest wear rate is observed at a sliding speed of 5.0 m/s and at friction coefficient of about

0.7 ± 0.05 . A low amplitude of friction coefficient fluctuations (0.7 ± 0.03) is observed when sliding at a speed of 8.0 m/s. X-ray phase analysis showed that contact layers of the samples at all sliding speeds have only α -Fe phase with a lattice parameter of about 0.287 nm.

Keywords: sliding metal contact, wear intensity, adhesion, oxidation, friction coefficient, sample holder temperature, phase composition of contact layer

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Problems of Socio-Mechanical Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, topic No. FWRW-2021-0006.

For citation: Aleutdinova M.I., Fadin V.V. Features of steel contact surface wear in sliding under low contact pressure. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(3):259–265. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-3-259-265>

ВВЕДЕНИЕ

Скользящий контакт металла по металлу обычно сопровождается изменением контактных поверхностей за счет пластической деформации и усталостного разрушения [1]. Мерой этого разрушения служит интенсивность изнашивания, которая является главной функциональной характеристикой скользящего контакта. Износ зависит от многих входных параметров трибосистемы, в частности, от контактной нагрузки, скорости скольжения, фазового состава контактных материалов, геометрии контакта и т.п. Эти факторы задают механизмы изнашивания, которое всегда обусловлено адгезионным и механическим взаимодействием неровностей контактных поверхностей [1; 2]. Изнашивание характеризуется также другими выходными параметрами трибосистемы: коэффициентом трения, структурными параметрами контактных слоев и т. п. [3 – 6].

Одним из самых тяжелых видов нагружения является воздействие сухим трением на металл. В этом режиме снижение скорости разрушения контактного слоя (а также износа) является возможным, например, в случае его самоорганизации, окисления на поверхности трения и т. п. [3; 5; 7 – 9]. Триботехническое поведение пар трения было исследовано, в первую очередь, при разных контактных давлениях и скоростях скольжения [4; 7; 10 – 16]. Было отмечено [7; 10; 15], что коэффициент трения обычно уменьшается при увеличении скорости скольжения, но в некоторых случаях он может увеличиваться [16]. Наблюдались также изменения структуры контактных слоев, в частности, их аморфизация и окисление [4; 8; 13 – 15]. Однако не были показаны температуры контакта или температуры держателей образцов, поэтому ориентировочные температуры, вызывающие окисление в зоне трения, не известны.

В общем случае температура в зоне контакта зависит от теплоотвода. Низкий теплоотвод, обусловленный низкой теплопроводностью образца или конструкцией держателя образца, вызывает высокие локальные температуры и высокие градиенты температуры в зоне контакта. Это приводит к быстрому разрушению поверхности скольжения при увеличении нагрузочных параметров. Нахождение взаимосвязи износа и теплового состояния трибосистемы является одной из актуальных задач триботехнического материаловедения. Определение температуры контакта имеет некоторые технические

трудности: температура может быть найдена (экспериментально или теоретически) только приблизительно. Температуру держателя образца можно определить проще и точнее. Именно поэтому эта температура может служить одной из характеристик скользящего контакта.

Поверхность скольжения часто бывает отшлифована и очищена от продуктов окисления перед проведением триботестов [17 – 19]. Представляет научный интерес определение целесообразности этих действий для снижения износа. Обычно продукты окисления на поверхности контакта являются разделительной средой между контактными поверхностями и вызывают снижение адгезии, коэффициента трения и износа [4; 5; 11; 12; 14 – 16; 20]. Однако в некоторых случаях окислительная газовая среда вызывает более сильный износ, чем износ в бескислородной среде [21]. Кроме того, различие конструкций узлов трения и других параметров трения в разных исследованиях могут быть причиной различия износа. Эти различия в характере трения указывают на необходимость дополнительных исследований в этом направлении. Сталь Ст3 может служить модельным образцом, а закаленная сталь 45 может служить модельным контртелом.

Целью настоящей работы является определение взаимосвязи износа стали Ст3, температуры держателя образца и фазового состава контактного слоя стали Ст3 при скольжении по стали 45 при разных скоростях скольжения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для изготовления наклепанных образцов ($H_{\mu} = 2,2$ ГПа) с площадью поперечного сечения $2,5 \times 4,0$ мм и высотой 6 мм использована низкоуглеродистая сталь Ст3 (0,2 % C). Рентгеновский фазовый анализ контактных слоев образцов проведен на дифрактометре ДРОН-7 в излучении CuK_{α} . Поверхности скольжения изучены с помощью конфокального лазерного микроскопа (CLM, Olympus OLS 4100).

Нагружение материалов трением проведено под давлением (P) 0,13 МПа без смазки, при скоростях скольжения $v = 0,75 \div 8,0$ м/с на машине трения СМТ-1 по схеме вал – колодка (точнее «pin-on-ring», рис. 1). Контртелом служила сталь 45 (0,42 – 0,50 % C) твердостью $H_{\mu} = 5,8$ ГПа (53 HRC). Термопары (хромель – копель) были зафиксированы на держателе образца с помощью

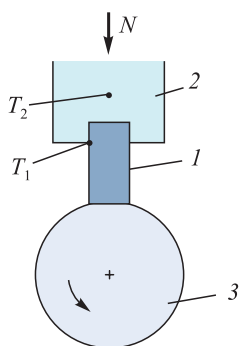


Рис. 1. Схема сопряжения *pin-on-ring*:
1 – образец; 2 – держатель образца; 3 – контртело;
 T_1 и T_2 – термопары на держателе образца

Fig. 1. *Pin-on-ring* configuration diagram:
1 – sample; 2 – sample holder; 3 – counterbody;
 T_1 and T_2 – thermocouples on sample holder

винтов. Линейная интенсивность изнашивания определена как $I_h = h/D$ (где h – изменение высоты образца; D – дистанция скольжения). Коэффициент трения был определен при помощи тензодатчика ZET 7111. Каждый тест был выполнен три раза.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Значения полученных параметров приведены в таблице, где a – параметр решетки α -Fe; I_{110}/I_{200} и I_{110}/I_{211} – отношение интенсивностей рентгеновских пиков α -Fe;

Значения полученных параметров

Values of the obtained parameters

Параметр	Значение параметра при скорости скольжения, м/с				
	0,75	1,3	2,5	5,0	8,0
a , нм	0,8730	0,2871	0,2873	0,2872	0,2871
I_{110}/I_{200}	4,43	4,83	6,58	11,33	10,32
I_{110}/I_{211}	2,29	2,95	3,15	4,52	3,96
T_1 , °C	20	23	28	31	35
T_2 , °C	20	21	24	26	28
I_h , мкм/км	36	130	250	4	30
B_{110} , град	0,283	0,330	0,439	0,467	0,485
B_{200} , град	0,315	0,447	0,471	0,415	0,576

T_1 и T_2 – температура термопар на держателе образца; I_h – интенсивность изнашивания; B_{110} и B_{200} – полуширина B_{hkl} рентгеновских пиков.

На поверхностях контакта, полученных при скольжении со скоростью в пределах 0,7 – 1,3 м/с, отсутствуют явные признаки адгезии (рис. 2, а, б). Рентгенография поверхностей контакта показала только фазу α -Fe (рис. 3, а). Параметр решетки этой фазы (см. таблицу) близок к стандартному значению 0,2866 нм (ASTM 6-696 Standard). Коэффициент трения f при этих скоростях снижается с течением времени и в дальней-

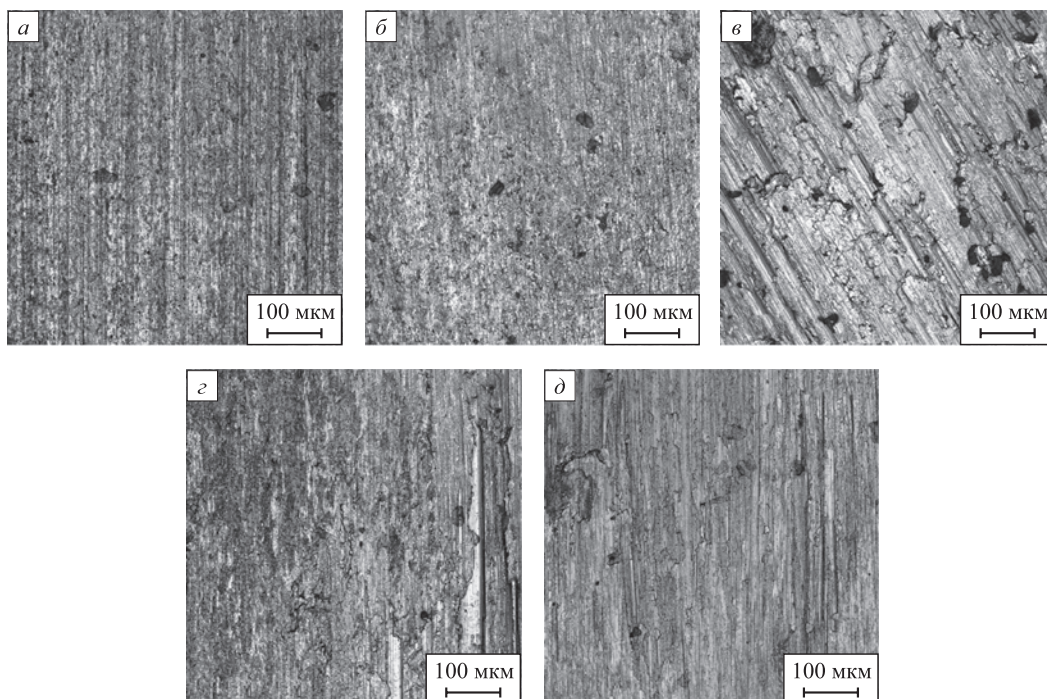


Рис. 2. Конфокальные изображения поверхностей контакта образцов (сталь Ст3) при скольжении со скоростями 0,75 (а), 1,3 (б), 2,5 (в), 5,0 (г) и 8,0 м/с (д)

Fig. 2. Confocal images of contact surfaces of the samples (C235 steel) in sliding at speeds of 0.75 (a), 1.3 (б), 2.5 (в), 5.0 (г) and 8.0 m/s (д)

шем сохраняет значение 0,4 (рис. 3, б, в). Снижение коэффициента трения связано с появлением слоя переноса на поверхности контртела. Этот слой наблюдается визуально и легко удаляется ветошью. Интенсивность изнашивания образцов I_h увеличивается с ростом скорости скольжения от 0,75 до 1,3 м/с (см. таблицу). Поверхности контактов образцов имеют приблизительно одинаковый вид (рис. 2, а, б).

Увеличение скорости скольжения до 2,5 м/с приводит к появлению признаков сильного адгезионного взаимодействия на поверхности контакта образца (рис. 2, в). Сильные колебания коэффициента трения и его высокие (0,7 – 0,8) значения (рис. 3, з) также указывают на сильную адгезию в контакте. Слой переноса на поверхности контртела отсутствует. В этих условиях наблюдается высокая интенсивность изнашивания I_h (см. таблицу). Контактный слой содержит только фазу α -Fe (рис. 3, а), параметр решетки остается близким к стандартному.

Скольжение при плотности тока 5,0 м/с происходит без образования слоя переноса. Визуальные признаки сильной адгезии отсутствуют (рис. 2, з). Адгезия проявляется в виде редких и сильных колебаний коэффициента трения (рис. 3, д). Контактный слой содержит только фазу α -Fe (рис. 3, а). Интенсивность изнашивания I_h имеет низкое значение (см. таблицу).

Скорость скольжения до 8,0 м/с вызывает появление рельефа с признаками слабого адгезионного взаимодействия на контактной поверхности образца (рис. 2, д) при коэффициенте трения 0,6. Слой переноса отсутствует. Структура контактного слоя представлена только фазой α -Fe (рис. 3, а). Износ I_h наблюдается высокий (см. таблицу).

Низкие температуры T_1 и T_2 держателя образца (см. таблицу) и отсутствие продуктов окисления на поверхности контакта (рис. 3, а) свидетельствуют о низкой температуре контакта. Видно также увеличение отношений I_{110}/I_{200} и I_{110}/I_{211} интенсивностей рентгеновских пиков при росте скорости скольжения (см. таблицу), что может указывать на образование деформационной текстуры. При скорости скольжения 8,0 м/с отношения интенсивностей рентгеновских пиков начинают снижаться, что может быть связано с частичной рекристаллизацией зерен или с удалением максимально текстурированного контактного подслоя в виде частиц износа. Кроме того, наблюдается общая тенденция роста полуширины B_{hkl} рентгеновских пиков при увеличении скорости скольжения (см. таблицу). Это связано с увеличением напряжений в контактном слое, уменьшением размеров областей когерентного рассеяния (ОКР) и другими причинами. Выяснение преимущественной причины увеличения B_{hkl} не представляет интереса для настоящей работы.

Многочисленные повторные механические и адгезионные воздействия, вызывающие превышение предела текучести в микрообъемах неровностей контакт-

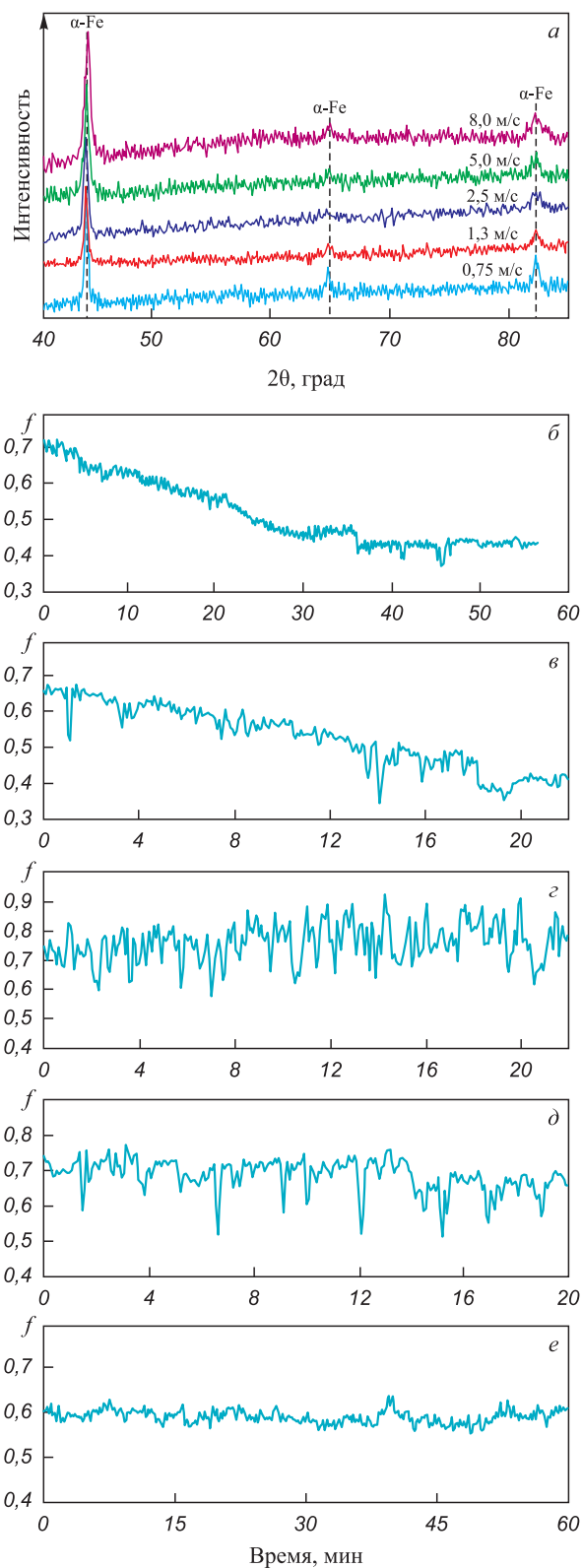


Рис. 3. Рентгенограммы поверхностей контакта образцов (сталь Ст3) при скольжении с разными скоростями (а) и зависимость коэффициента трения от времени в контакте Ст3/сталь 45 при скольжении со скоростью 0,75 (б), 1,3 (в), 2,5 (з), 5,0 (д) и 8,0 м/с (е)

Fig. 3. X-ray diffraction patterns of contact surfaces of the samples (C235 steel) when sliding at different speeds (a) and time dependence of the friction coefficient in St3/45 steel contact when sliding at a speed of 0.75 (b), 1.3 (v), 2.5 (z), 5.0 (d) and 8.0 m/s (e)

ной поверхности, приводят к накоплению дефектов разных масштабов, то есть образуются вакансии, поры, зерна малых размеров и другие дефекты структуры в зоне контакта. В этом случае наблюдаются усталостное разрушение и возникновение частиц износа. Следует отметить, что усталостные разрушения за счет адгезии обычно преобладают над разрушением при механическом соударении двух встречных микронеровностей [1]. Как правило, механизм разрушения зоны контакта зависит от способа релаксации напряжений, а этот способ зависит от условий нагружения. Например, изменение скорости скольжения, то есть изменение скорости деформации (изменение скорости введения энергии в контактный слой) вызывает изменение скорости разрушения контактного слоя (интенсивности изнашивания I_h (см. таблицу)). Это указывает на изменение механизмов релаксации напряжений при изменении скорости скольжения v .

Низкие скорости скольжения способствуют относительно слабому механическому взаимодействию двух встречных неровностей, но обеспечивают длительный контакт в пятнах контакта и соответствующее длительное адгезионное взаимодействие. Поэтому есть вероятность возникновения адгезии в пятнах контакта, которая может быть прочнее когезионных связей под пятном контакта. Это может привести к отделению микрообъема образца и его переносу на поверхность контртела. Появление слоя переноса на поверхности скольжения контртела при скоростях 0,75 – 1,3 м/с и некоторого износа образца (см. таблицу) вполне соответствует такому механизму. В этом случае микронеровность может разрушиться сразу за счет адгезии или за счет усталости, возникающей вследствие многократного адгезионного воздействия. Этот слой переноса легко удаляется и способствует проявлению коэффициента трения, значение которого ниже, чем при скольжении по чистой (начальной) поверхности контакта (рис. 3, б, в). Очень вероятно, что напряжения при этих скоростях релаксируют преимущественно за счет пластических сдвигов и образования дислокационных и дисклинационных структур в очень тонком контактном слое со слабой текстурой. Эти сдвиговые механизмы являются активными при любом режиме трения, но они не всегда могут быть главными.

Высокие адгезионные напряжения в скользящем контакте могут быть релаксированы только за счет большой сдвиговой пластической деформации с образованием большого количества несплошностей (микропор, микротрещин и т.п.) при $v = 2,5$ м/с, то есть когда отсутствуют более эффективные механизмы релаксации напряжений.

Известно [22; 23], что импульсное нагружение металла приводит к усилению диффузии, которая является одним из способов релаксации напряжений. Следует ожидать заметного проявления этого эффекта в импульсном контакте неровностей при увеличе-

нии скорости скольжения. Низкий износ образца при $v = 5,0$ м/с указывает на возможность проявления этого эффекта и на образование диссипативных структур в контактном слое. Эти структуры исчезают после выхода пятен контакта из сопряжения. Определение механизма релаксации является темой отдельной работы и здесь не проводится.

Представленные механизмы релаксации напряжений могут проявиться также при $v = 8,0$ м/с. Но значение I_h достаточно высокое (см. таблицу), так как пластически деформированный контактный слой должен расти при увеличении скорости скольжения, обеспечивая и рост скорости деформации. Поэтому следует ожидать увеличения износа при увеличении скорости скольжения выше 5,0 м/с, несмотря на уменьшение коэффициента трения и амплитуды его колебаний (рис. 3, е). Следует отметить, что часто значение I_h снижается при увеличении скорости скольжения [15; 24]. Более точные данные предполагается получить при $v > 8,0$ м/с в отдельной работе.

Выводы

Получены данные об износе стали Ст3 при трении по стали 45 при отсутствии продуктов окисления между ними и при скоростях скольжения до 8 м/с под контактными давлениями 0,13 МПа.

Фазовый состав контактных поверхностей состоит из фазы α -Fe, имеющей параметр решетки 0,287 нм при всех рассмотренных скоростях скольжения. Температура держателя образца не превышает 35 °С при скорости скольжения в интервале от 0,75 до 8 м/с.

Увеличение скорости скольжения вызывает усиление образования текстуры контактного слоя. При скоростях скольжения 0,75 и 1,3 м/с на контактной поверхности контртела удерживается слой переноса, что вызывает снижение коэффициента трения до 0,4, но при этом наблюдается адгезионный износ.

Увеличение скорости скольжения до 2,5 м/с вызывает рост интенсивности изнашивания вследствие сильной адгезии в контакте. Увеличение скорости скольжения в интервале 2,5 – 5,0 м/с приводит к резкому снижению интенсивности изнашивания, а в интервале 5,0 – 8,0 м/с – к некоторому ее увеличению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Kragelsky I.V., Dobychin M.N., Kambalov V.S. Friction and Wear: Calculation Methods. Elsevier; 2013:474.
2. Bowden F.P., Tabor D. Friction: An Introduction to Tribology. R.E. Krieger Publishing Company; 1982:178.
3. Li B.Y., Li A.C., Zhao S., Meyers M.A. Amorphization by mechanical deformation. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2022;149:100673. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2022.100673>
4. Wang S.Q., Wang L., Zhao Y.T., Sun Y., Yang Z.R. Mild-to-severe wear transition and transition region of oxidative wear

- in steels. *Wear*. 2013;306(1-2):311–320.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.08.017>
5. Jradi K., Schmitt M., Bistac S. Surface modifications induced by the friction of graphites against steel. *Applied Surface Science*. 2009;255(7):4219–4224.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.11.019>
 6. Haftlang F., Zarei-Hanzaki A., Abedi H.R. In-situ frictional grain refinement of Ti–29Nb–14Ta–4.5Zr bio-alloy during high-speed sliding wear. *Materials Letters*. 2020;261:127083.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127083>
 7. Nosonovsky M., Bhushan B. Surface self-organization: From wear to self-healing in biological and technical surfaces. *Applied Surface Science*. 2010;256(12):3982–3987.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.01.061>
 8. Yin C.-h., Liang Y.-l., Liang Yu., Li W., Yang M. Formation of a self-lubricating layer by oxidation and solid-state amorphization of nano-lamellar microstructures during dry sliding wear tests. *Acta Materialia*. 2019;166:208–220.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.12.049>
 9. Yin C., Qin X., Li Sh., Liang Y., Jiang Y., Sun H. Amorphization induced by deformation at ferrite-cementite nanointerfaces in a tribolayer and its effect on self-lubricating. *Materials & Design*. 2020;192:108764.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108764>
 10. Kennedy F.E., Lu Y., Baker I., Munroe P.R. The influence of sliding velocity and third bodies on the dry sliding wear of Fe₃₀Ni₂₀Mn₂₅Al₂₅ against AISI 347 stainless steel. *Wear*. 2017;374-375:63–76.
<http://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.002>
 11. Straffellini G., Pellizzari M., Maines L. Effect of sliding speed and contact pressure on the oxidative wear of austempered ductile iron. *Wear*. 2011;270(9-10):714–719.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.02.004>
 12. Banerji A., Lukitsch M.J., McClory B., White D.R., Alpas A.T. Effect of iron oxides on sliding friction of thermally sprayed 1010 steel coated cylinder bores. *Wear*. 2017;376-377(A):858–868.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.02.032>
 13. Zhao H., Feng Yi., Zhou Z., Qian G., Zhang J., Huang X., Zhang X. Effect of electrical current density, apparent contact pressure, and sliding velocity on the electrical sliding wear behavior of Cu–Ti₃AlC₂ composites. *Wear*. 2020;444-445:203156. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203156>
 14. Wang D., Chen Xi., Li F., Chen W., Li H., Yao C. Influence of normal load, electric current and sliding speed on tribological performance of electrical contact interface. *Microelectronics Reliability*. 2023;142:114929.
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2023.114929>
 15. Aleutdinova M.I., Fadin V.V. On dry wear of metallic materials in different configurations of sliding electrical contacts against quenched AISI 1045 steel. *Russian Physics Journal*. 2023;65(10):1768–1774.
<https://doi.org/10.1007/s11182-023-02829-z>
 16. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. Москва: Машиностроение; 2003:576.
 17. Khanafi-Benghalem N., Felder E., Loucif K., Montmitonnet P. Plastic deformation of 25CrMo4 steel during wear: Effect of the temperature, the normal force, the sliding velocity and the structural state. *Wear*. 2010;268(1-2):23–40.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.06.036>
 18. Wang S.Q., Wei M.X., Zhao Y.T. Effects of the tribo-oxide and matrix on dry sliding wear characteristics and mechanisms of a cast steel. *Wear*. 2010;269(5-6):424–434.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.04.028>
 19. Hu T., Wen C.S., Sun G.Y., Wu S.L., Chu C.L., Wu Z.W., Li G.W., Lu J., Yeung K.W.K., Chu P.K. Wear resistance of NiTi alloy after surface mechanical attrition treatment. *Surface and Coatings Technology*. 2010;205(2):506–510.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.07.023>
 20. Rynio C., Hattendorf H., Klower J., Eggeler G. On the physical nature of tribolayers and wear debris after sliding wear in a superalloy/steel tribosystem at 25 and 300 °C. *Wear*. 2014;317(1-2):26–38.
<http://doi.org/10.1016/j.wear.2014.04.022>
 21. Saravanan Pr., Selyanchyn R., Tanaka Hi., Fujikawa Sh., Lyth S.M., Sugimura J. The effect of oxygen on the tribology of (PEI/GO)15 multilayer solid lubricant coatings on steel substrates. *Wear*. 2019;432-433:102920.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.05.035>
 22. Лариков Л.Н., Фалоченко В.М., Мазанко В.Ф. Аномальное ускорение диффузии при импульсном нагружении металлов. *Доклады АН СССР*. 1975;221(5):1073–1075.
Larikov L.N., Falochenko V.M., Mazanko V.F. Abnormal acceleration of diffusion during pulse loading of metals. *Reports of the USSR Academy of Sciences*. 1975;221(5): 1073–1075. (In Russ.).
 23. Straumal B.B., Mazikin A.A., Baretzky B., Schütz G., Rabkin E., Valiev R.Z. Accelerated diffusion and phase transformations in CoCu alloys driven by the severe plastic deformation. *Materials Transactions*. 2012;53(1):63–71.
<https://doi.org/10.2320/matertrans.MD201111>
 24. Bannaravuri P.K., Birru A.K. Strengthening of mechanical and tribological properties of Al-4.5%Cu matrix alloy with the addition of bamboo leaf ash. *Results in Physics*. 2018; 10:360–373. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.06.004>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Марина Ивановна Алеутдинова, к.т.н., научный сотрудник лаборатории физики упрочнения поверхности, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН
ORCID: 0000-0003-4940-9221
E-mail: aleut@ispms.ru

Виктор Вениаминович Фадин, д.т.н., доцент, старший научный сотрудник лаборатории физики упрочнения поверхности, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН
ORCID: 0000-0002-5028-1002
E-mail: fvv@ispms.ru

Marina I. Aleutdinova, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate of the Laboratory of Physics of Surface Hardening, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0003-4940-9221
E-mail: aleut@ispms.ru

Viktor V. Fadin, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Senior Researcher of the Laboratory of Physics of Surface Hardening, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-5028-1002
E-mail: fvv@ispms.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

М. И. Алеутдинова – разработка оригинального проекта и методологии, концептуализация, расчет полученных параметров.

В. В. Фадин – написание и редактирование текста, проведение исследований.

M. I. Aleutdinova – development of the original project and methodology, conceptualization, calculation of the obtained parameters.

V. V. Fadin – writing and editing the text, conducting research.

Поступила в редакцию 11.10.2024

После доработки 24.12.2024

Принята к публикации 26.12.2024

Received 11.10.2024

Revised 24.12.2024

Accepted 26.12.2024