

# ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНІ НАУКИ

DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2019-11-75-34>

УДК 620.179

Евдокимова А.Н., Муравьёва И.А., Бригадир Д.И.  
Одесская государственная академия строительства и архитектуры

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТРИБОЛОГИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЗНАКОПЕРЕМЕННОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

**Аннотация.** Статья посвящена трению и износу стальных поверхностей. Для проведения экспериментов была разработана установка. Установка включала два быстровращающихся диска и прижимаемый образец. Если диски вращались в разные стороны, то образец находился под воздействием односторонних сдвиговых деформаций. При вращении дисков в одну сторону осуществлялся реверс. Установлен эффект инверсии кривых микротвердости и износа при реверсивном и однонаправленном трении в зависимости от углерода в стали, который при отсутствии смазки находится в пределах порядка четырех десятых процентного содержания. Экспериментально показано, что высокоскоростное знакопеременное трение может упрочнять сталь с повышением твердости и износостойкости в большей степени, чем однонаправленное трение, что предлагается использовать в практических целях.

**Ключевые слова:** трение, износ, скольжение, высокие скорости, микротвердость, реверсивность движения, эффект упрочнения.

Evdokimova Alla, Muravjova Irina, Brigadir Dmitry  
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

## SOME OF THE FEATURES OF TRIBOLOGY HIGH SPEED ALTERNATING DEFORMATION

**Summary.** In modern technology, various machines and mechanisms operating at high friction speeds are widely used. In technology, the friction effect is extremely negative, that it inevitably involves unproductive energy costs, abrasion of machines and mechanisms. Accordingly, there are a lot of scientific literature sources on tribology. On the brighter note, one area can be emphasized that has not been subjected to focused research, with the exception of the works. This is a comparative evaluation of ongoing processes of the state of surface layers under the influence of unidirectional and alternating shear deformations. So it first proved that the revealed regularities can be used to increase the service life of machines. The purpose of the work is to show, in comparable conditions, the differences in the properties of the working friction surfaces that arise under one-directional and alternating deformation and their effect on the durability. Concept of the work. In order to conduct the research according to the comparative features of alternating and one-directional sliding friction, there was a necessity to develop a new technique, as the known technique included the elementary cycles with a stop after each cycle. Such a technique included the elementary cycles with a stop after each cycle. This one is reasonable at low speeds, because it led to a rapid stop of the machine spindle. But at higher speeds, during each stop with following acceleration to the selected speed the runout led to the friction at different speeds. Consequently the original technique was developed, in which the friction occurred without interruption before change in the direction of movements. Conclusions. It is established that under high-speed one-directional and alternating friction, the common denominators in hardening and wear of steels are present. However, under certain condition there is an inversion of the hardness and wear curves, in which reverse high-speed friction increases the working properties of steels in a greater degree than one-directional ones. This mechanism can be used for practical purposes.

**Keywords:** friction; wear; sliding; high speed; micro-hardness; reverse motion; strengthening effect.

**Постановка проблемы.** В современной технике широко используются различные машины и механизмы, работающие при высоких скоростях трения. Соответственно имеется и достаточно обширная научная литература, посвященная этой области трибологии [1–3]. Однако при всем многообразии можно выделить направление, которое не подвергалось целенаправленным исследованиям за исключением работ [4; 5]. Это сравнительная оценка протекающих процессов состояния поверхностных слоев, находящихся под воздействием однонаправленных и знакопеременных сдвиговых деформаций. В них впервые было показано, что выявленные закономерности могут быть использованы для повышения срока службы машин.

**Цель статьи.** Главная цель этой работы показать в сравнимых условиях различия в свойствах рабочих поверхностей трения, возникающих при однонаправленном и знакопеременном деформировании и их влияние на долговечность.

**Методология проведения работы.** Прежде всего, определенную сложность составляла сама методика создания сравнительных условий высокоскоростного и однонаправленного трения. Так, ранее [5] использовались одинаковые циклы, каждый из которых включал разгон под нагрузкой, трение при установившейся скорости и выбег до полной остановки с многократным повторением. Но при высоких скоростях порядка 50-100 м/с такая методика не могла быть применима из-за главной причины –

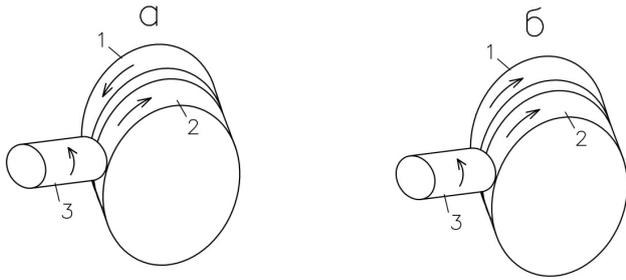


Рис. 1. Метод осуществления одностороннего (а) и реверсивного (б) высокоскоростного трения: 1, 2 – диски; 3 – испытываемый образец

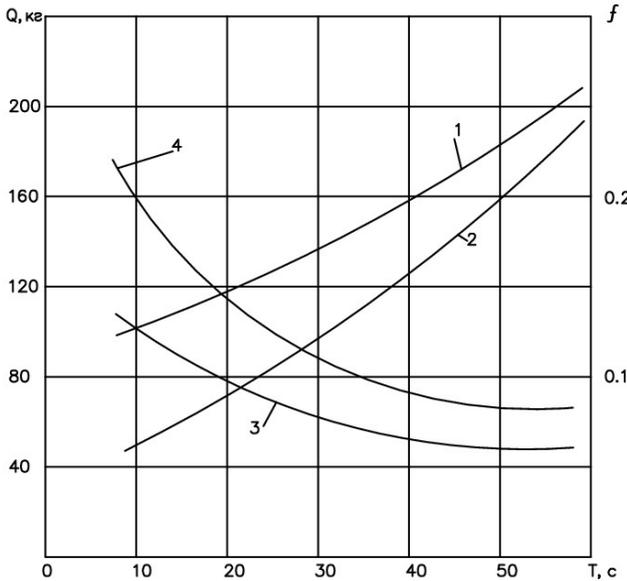


Рис. 2. Износ и коэффициент трения образцов из стали 45 при одностороннем и реверсивном трении без смазки (70 м/с; 100 Н). Кривые: 1, 2 – износ при одностороннем и реверсивном трении; 3, 4 – коэффициент трения при одностороннем и реверсивном скольжении

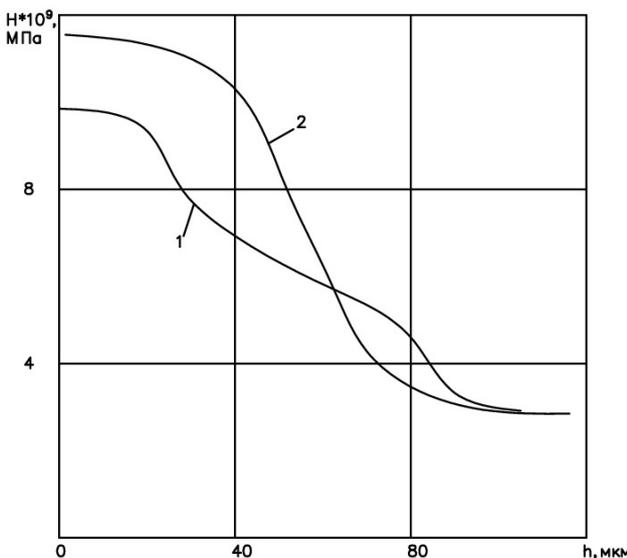


Рис. 3. Изменение микротвердости по глубине в образцах из стали 45 после высокоскоростного трения без смазки. Трение 10 с, нагрузка 100 Н. Кривые: 1 – одностороннее трение; 2 – реверсивное трение

длительного процесса остановки фрикционных дисков диаметром каждый 300 мм. За время выбега до остановки окружная скорость дисков изменяется от принятой рабочей до нуля, что позволяло четко исследовать процесс трения при заданной высокой скорости. Поэтому была непригодной.

Указанный недостаток был преодолен благодаря разработанной методике испытаний с применением кинематической схемы, включающей не один фрикционный диск, как принято, а два [4]. Каждый такой диск имел самостоятельный привод с электродвигателем и получил возможность независимого вращения в любую сторону. Но небольшой вращающийся с заданной скоростью образец, прижимаемый одновременно к двум цилиндрическим поверхностям дисков, получил однонаправленные или знакопеременные сдвиговые высокоскоростные деформации без остановки процесса трения и изменение принятой скорости. Принципиальная схема такой установки показана на рисунке 1.

**Исследования.** Экспериментальные данные по износу и коэффициентам трения для стали 45 приведены на рисунке 2. Из этих данных видно, что с увеличением времени трения износ увеличивается, как для однонаправленного, так и для реверсивного трения. Однако при реверсивном трении износ образцов оказался меньше, чем при однонаправленном. Соответственно изменились и коэффициенты трения. Такая закономерность наблюдалась и для других сталей.

Было сделано предположение, что при больших скоростях трения знакопеременность деформаций приводит к более высокой степени упрочнения рабочих поверхностей, чем однонаправленное трение, с образованием вторичных структур типа белых слоев. Измерение микротвердости подтвердило это предположение.

Как следует из рисунка 3, кривая 2, отвечающая упрочнению поверхностных слоев при реверсивном трении лежит выше кривой 1 однонаправленного трения. И эта закономерность распространяется от поверхности трения на глубину более 50 мм с образованием твердых белых слоев (рисунок 4). Приведенные выше опытные данные на образцах из стали 45 позволили расширить объем экспериментов для определения влияния знакопеременного или однонаправленного высокоскоростного трения и содержания углерода в сталях на их микротвердость и износ. Такие весьма объемные эксперименты были проведены и обобщены.

Кривые на рисунке 5 показывают изменение микротвердости поверхностных слоев, измеренной на образцах с различным содержанием углерода от армко-железа до инструментальной стали У10 после одностороннего (кривая 1) и реверсивного трения без смазки (кривая 2) в течении 10 секунд при

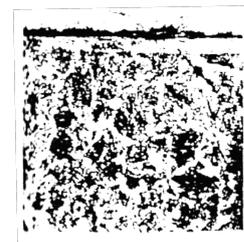


Рис. 4. Белый слой на стали 60 после реверсивного трения без смазки (70 м/с; 100 Н; 40 с)

нагрузке 100 Н и скорости 70 м/с. Видно, что поверхностные слои получают значительное упрочнение для сталей с содержанием углерода более 0,3%. При этом наблюдается интересная закономерность при которой малоуглеродистые стали получают большее упрочнение при однонаправленном трении, чем при реверсивном, что видно по верхнему расположению кривой 1 над кривой 2 для стали, начиная от армко-железа до стали 30. Затем происходит инверсия в расположении кривых, которая выражается в верхнем расположении кривой 2 над кривой 1, что свидетельствует о более высокой степени упрочнения поверхностных слоев при знакопеременном протекании сдвиговых деформаций при высокоскоростном трении нежели при однонаправленном деформировании.

Причем имеет место не только значительная разница в величине упрочнения, но и в тенденции повышения твердости при знакопеременном трении сталей с содержанием углерода более 0,6% по сравнению с однонаправленным трением, при котором упрочнение слабо возрастает несмотря на увеличение содержания углерода в стали.

Экспериментальные данные по микротвердости дополним результатами измерения износа из сталей с различным содержанием углерода, испытанных после одностороннего или знакопеременного высокоскоростного трения. По кривым 3, 4 на рисунке 5 видно, что с ростом процентного содержания углерода в сталях их износостойкость увеличивается как при одностороннем так и при знакопеременном деформировании. Однако взаимное расположение кривых 3, 4 не остается все время постоянным, а получает инверсию для сталей начиная с 0,35 ÷ 0,40 процентного содержания углерода. С ростом содержания углерода более 0,35 ÷ 0,40 износ сталей при реверсивном трении становится меньше, чем при однонаправленном.

Как полагаем, эта закономерность должна стать ключевой при использовании высокоскоростного трения в практических целях для упрочнения сталей.

### Список литературы:

1. Власов В.М. Работоспособность упрочненных трущихся поверхностей. Москва, 1987. 304 с.
2. Процессы упрочнения деталей машин. ГКПМПГ СССР АН СССР. Ин-т машиноведения под ред. П.Е. Дьяченко. Москва : Наука, 1964. 208 с.
3. Полевой С.Н., Евдокимов В.Д. Упрочнение машиностроительных материалов : справочник. Москва, 1994. 496 с.
4. Евдокимова А.Н. Знакопеременное высокоскоростное трение и его технологические возможности. Одесса : УМАОИ, 1997. 210 с.
5. Евдокимова А.Н. Знакопеременность сдвиговых деформаций при высокоскоростном трении и шлифовании и свойства поверхностных слоев. Одесса : УМАОИ, 1998. 113 с.
6. Евдокимов В.Д. Трибология знакопеременного трения. Одесса : Интерпринт, 2011. 432 с.
7. Евдокимов В.Д., Довбенко М.Н. Повышение долговечности аксиально-поршневых гидромашин. Одесса : Интерпринт, 2013. 144 с.

### References:

1. Vlasov, V.M. (1987). Rabotosposobnost uprochnennykh truschihsya poverhnostey [The performance of hardened rubbing surfaces]. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
2. Dyachenko, P.E. (1964). Protessy uprochneniya detaley mashin [Hardening processes of machine parts]. Moscow: Nauka. (in Russian)
3. Polevoy, S.N., & Evdokimov, S.N. (1994). Uprochnenie mashinostroytelnykh materialov : spravochnik [Hardening of engineering materials: Directory]. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
4. Evdokimova, A.N. (1997). Znakoperemennoe vyisokoskorostnoe trenie i ego tehnologicheskie vozmozhnosti [Alternating high-speed friction and its technological capabilities]. Odessa: UMAOI. (in Russian)
5. Evdokimova, A.N. (1998). Znakoperemennost sdivgovyih deformatsiy pri vyisokoskorostnom trenii i shlifovanii i svoystva poverhnostnykh sloev [Alternating sign of shear deformations during high-speed friction and grinding and properties of surface layers]. Odessa: UMAOI. (in Russian)
6. Evdokimov, V.D. (2011). Tribologiya znakoperemennogo treniya [Alternating Friction Tribology]. Odessa: Interprint. (in Russian)
7. Evdokimov, V.D., & Dovbenko, M.N. (2013). Povyishenie dolgovechnosti aksialno-porshnevyykh gidromashin [Increased durability of axial-piston hydraulic machines]. Odessa: Interprint. (in Russian)

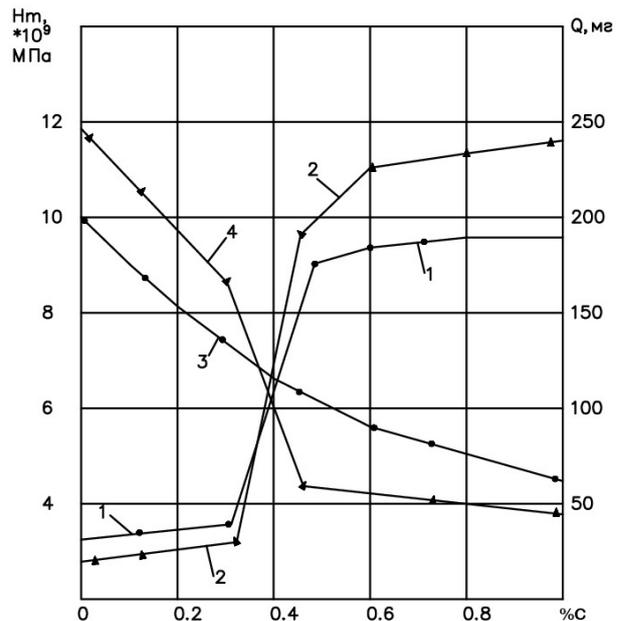


Рис. 5. Влияние знакопеременности высокоскоростного трения без смазки на упрочнение и износ сталей с различным содержанием углерода. 70 м/с; 100 Н; 10 с. Кривые: 1, 2 – микротвердость; 3, 4 – износ; 1, 3 – однонаправленное трение; 2, 4 – знакопеременное

### Выводы:

1. Установлено, что при высокоскоростном однонаправленном и знакопеременном трении наблюдаются общие закономерности по упрочнению и износу сталей.
2. Однако при определенных условиях имеет место инверсия кривых твердости и износа, при которой реверсивное высокоскоростное трение повышает эксплуатационные свойства сталей в большей степени, чем однонаправленное. Эта закономерность может быть использована в практических целях.