

ISSN 0202-4977

**Т**РЕНИЕ  
И **И**ЗНОС

**F**RICTION  
and **W**EAR

TOM 39  
VOL.

6  
2018

# ТРЕНИЕ И ИЗНОС

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

*Издается с января 1980 г.*

Выходит один раз в два месяца, один том в год

---

---

ГОМЕЛЬ • ИММС НАН БЕЛАРУСИ • 2018, ТОМ 39, № 6

---

---

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Бухаров С. Н., Меринов В. К., Сенатрев А. Н., Сергиенко В. П.</b> Исследование влияния оксида железа (III) на триботехнические и виброакустические характеристики фрикционных композитов для узлов стационарного трения .....	567
<b>Вайтехович П. Е.</b> Комбинированная модель абразивного износа лопастей ротора-ускорителя центробежной мельницы.....	573
<b>Тютюма В. Д.</b> Некоторые особенности формирования давления в зазоре подшипника скольжения .....	582
<b>Ильющенко А. Ф., Лешок А. В., Роговой А. Н.</b> Спеченный порошковый фрикционный материал на основе меди наполненный фулереноподобным стеклоуглеродом.....	589
<b>Панова М. О., Краснов А. П., Наумкин А. В., Клабукова Л. Ф., Каграманов Н. Д., Буяев Д. И., Соловьева В. А., Смирнова Ю. Н.</b> Трибохимические процессы в фенолоформальдегидном полимере, модифицированном сополимером полиформальдегида.....	596
<b>Слепцова С. А., Лазарева Н. Н., Федосеева В. И., Капитонова Ю. В., Охлопкова А. А.</b> Влияние катионов металлов механоактивированного бентонита на трибохимические процессы в ПТФЭ .....	604
<b>Лукашевич А.</b> Нелинейная численная модель фрикционного нагревания при ротационной сварке трением.....	612
<b>Одинцов В. В., Корень Е. В.</b> Исследование трибологических свойств додекаборидов редкоземельных металлов .....	620
<b>Козлов Г. В., Долбин И. В.</b> Перколяционная модель фрикционного износа углепластиков на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена .....	625
<b>Стечишин М. С., Мартынюк А. В., Билык Ю. М.</b> Кавитационно-эрозионная износостойкость полимерных материалов.....	631

<b>Войтов В. А., Цымбал Б. М.</b> Исследование триботехнических характеристик совместимых материалов в трибосистемах экструдеров для получения твёрдого топлива из биомассы .....	642
<b>Хопин П. Н., Козлова О. В., Горбач Л. Е.</b> Оценка долговечности пар трения с твёрдосмазочными покрытиями при реверсивном движении.....	649
<b>Логвиненко П. Н., Дмитриева Т. В., Бойко В. В., Карсим Л. О., Глиевая Г. Е., Невмержицкая Г. Ф., Рябов С. В.</b> Дисперсионные среды для абразивной обработки металлов на основе водных бинарных композиций модифицированные ПЭГ—Стеарокс-6 .....	657
<b>Любичева А. Н., Кудрицкий В. Г., Горячева И. Г.</b> Вязкоупругий контакт текстурированных поверхностей.....	663
<b>Герашенков Д. А., Соболев М. Ю., Марков М. А., Герашенкова Е. Ю., Быкова А. Д., Красиков А. В., Макаров А. М.</b> Триботехнические свойства металлокерамических покрытий Al—Sn—Zn—Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> для пар трения .....	669
<b>Громаковский Д. Г., Кудюров Л. В., Шигин С. В.</b> Повышение ресурса работоспособности стыка “шарошка—штанга” буровых долот .....	676
<b>Ковалева И. Н., Григорьев Ф. А.</b> Коррозионное воздействие и окисление растительных масел, используемых в смазочных материалах.....	684
<b>Бахарева В. Е., Горячева И. Г., Лишевич И. В., Никитина И. В.</b> Низкомодульные углеродные волокна для антифрикционных углепластиков.....	689
<b>Копченков В. Г.</b> Механизм изнашивания эластомеров прямым ударом твердых частиц в водной среде.....	699
<b>Содержание тома 39</b> (январь—декабрь 2018 г.) .....	705
<b>Авторский указатель</b> .....	710

---

Подписано в печать 10.09.2018. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Напечатано на ризографе. Усл. печ. л. 13,5. Тираж 120 экз. Заказ № 15-18

---

ИММС НАН Беларуси, 246050, г. Гомель, ул. Кирова, 32-а. Регистрация № 1/244 от 25.03.14.

© ИММС НАН Беларуси

© Редакторы-составители: Григорьев А. Я., Мышкин Н. К., Ковалёва И. Н., 2018

# FRICITION AND WEAR

INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL

*Published since January 1980*

Released bimonthly, one volume a year

---

---

GOMEL • MPRI NAS OF BELARUS • 2018, VOLUME 39, N 6

---

---

## CONTENTS

<b>Bukharov S. N., Merinov V. K., Senatrev A. N. and Sergienko V. P.</b> Studies in the Effect of Iron Oxide (III) on Tribotechnical and Vibroacoustic Performance of Brake Composites for Stationary Tribosystems .....	567
<b>Vaitekhovich P. E.</b> A Combined Model of Abrasive Wear of the Blades of the Rotor-Accelerator Centrifugal Mill .....	573
<b>Tyutyuma V. D.</b> Special Features of Pressure Formation in the Sliding Bearing Clearance .....	582
<b>Ilyuschenko A. F., Leshok A. V., and Rogovoi A. N.</b> Sintered Powder Brake Material Based on Copper with Fullerene-Like Filler .....	589
<b>Panova M. O., Krasnov A. P., Naumkin A. V., Klabukova L. F., Kagramanov N. D., Buyaev D. I., and Soloveva V. A.</b> Tribochemical Processes in Phenol Formaldehyde Polymer Modified by Polyformaldehyde Copolymer .....	596
<b>Sleptsova S. A., Lazareva N. N., Fedoseeva V. I., Kapitonova Yu. V., and Okhlopko-va A. A.</b> Influence of Metal Cations of Mechanoactivated Bentonite on Tribochemical Processes in PTFE .....	604
<b>Łukaszewicz A.</b> Nonlinear Numerical Model of Heat Generation in the Rotary Friction Welding .....	612
<b>Odintsov V. V. and Koren E. V.</b> Investigation of Tribological Properties of Dodecabo-rides of Rare-Earth Metals .....	620
<b>Kozlov G. V. and Dolbin I. V.</b> The Percolation Model of Friction Wear of Carbon Plas-tics on the Basis of Ultrahigh-Molecular Polyethylene .....	625
<b>Stechishin M. S., Martinyuk A. V., and Bilik Y. M.</b> Cavitation and Erosion Resistance of Polymeric Materials .....	631
<b>Vojtov V. A. and Tsybal B. M.</b> Study of Tribological Characteristics of Compatible Materials in Tribosystems of Extruders for Obtaining Solid Fuel from Biomass .....	642

<b>Khopin P. N., Kozlova O. V., and Gorbach L. E.</b> Assessment of Durability of Couples of Friction with Solid Lubricating Coatings at the Reversive Movement .....	649
<b>Logvinenko P. N., Dmitrieva T. V., Boyko V. V., Karsim L. O., Glieva G. E., Nevmerdzitska G. F., and Riabov S. V.</b> Dispersion Media Based on Aqueous Binary Compositions — Modified by PEG-Stearox-6 for Abrasive Metalworking.....	657
<b>Lyubicheva A. N. and Goryacheva I. G.</b> Viscoelastic Contact of Textured Surfaces .....	663
<b>Gerashchenkov D. A., Sobolev M. Y., Markov M. A., Gerashchenkova E. Y., Bykova A. D., Krasikov A. V., and Makarov A. M.</b> Tribological Study of Cermet Coatings Al–Sn–Zn–Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> for Friction Couples.....	669
<b>Gromakovsky D. G., Kudyurov L. V., and Shigin S. V.</b> Improving of Resource of Work of the Joint “Cone — Drill Rod” of the Drill Bit by Installing of Package of Intermediate Washers .....	676
<b>Kavaliova I. N. and Grigoriev F. A.</b> Corrosion Activity and Oxidation of Vegetable Oil Used in Lubricants.....	684
<b>Bakhareva V. E., Goryacheva I. G., Lishevitch I. V., and Nikitina I. V.</b> Low Modulus Carbon Fibers for Antifriction Carbon Plastics.....	689
<b>Kopchenkov V. G.</b> Mechanisms of Wear of Elastomers under Direct Impact of Solid Particles in the Water Medium .....	699
<b>Contents of Volume 39</b> (January–December 2018) .....	705
<b>Author Index of Volume 39, Nos. 1–6</b> .....	710

УДК 621.891

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОВМЕСТИМЫХ МАТЕРИАЛОВ В ТРИБОСИСТЕМАХ ЭКСТРУДЕРОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТВЁРДОГО ТОПЛИВА ИЗ БИОМАССЫ

В. А. ВОЙТОВ<sup>а</sup>, Б. М. ЦЫМБАЛ<sup>б+</sup>

В работе представлены результаты исследований триботехнических характеристик совместимых материалов, толщины защитных плёнок, глубины царапин и шероховатости поверхностей трения образцов модельных трибосистем экструдера EB-350 и EB-350-50M для получения твёрдого топлива из биомассы. Обнаружено, что при добавлении щелочной присадки в виде гидроксида натрия, создании слабощелочной среды pH 7,4, уменьшается скорость изнашивания и увеличивается ресурс шнека и фильер экструдера. Выявлено, что при слабощелочной среде pH 7,4 шероховатость рабочих поверхностей трения меньше, чем шероховатость поверхностей с слабокислой pH 5 и сильнощелочной средой pH 11. Установлен рейтинг влияния факторов на процесс изнашивания, к которым в порядке убывания, относятся абразивность, активная кислотность среды и нагрузка. С учётом полученного рейтинга выполнено обоснование совместимых материалов в трибосистеме экструдера — сталь 95X18 и чугун ЧХ32, которые позволяют повысить их ресурс. Проведёнными исследованиями установлено, что при использовании сырья, которое имеет слабощелочную среду, близкую к нейтральной, на рабочих поверхностях наблюдаются незначительные следы коррозии, что связано с образованием на поверхности металла пассивных плёнок, которые замедляют диффузию кислорода к поверхности металла и каталитически снижают скорость коррозии.

**Ключевые слова:** трибосистемы экструдера, растительная биомасса, коррозионно-механическое изнашивание, кислотность биомассы, скорость изнашивания, совместимость материалов в слабощелочной среде.

**Введение.** Во всём мире производство твёрдого топлива из растительного сырья, которое является возобновляемым источником энергии, является перспективным направлением. Растительное сырьё, из которого изготавливают топливные брикеты, в своём составе имеет значительный уровень абразивности и кислотности, которые приводят к коррозионно-абразивному изнашиванию шнека и фильер экструдера, уменьшению ресурса шнека и фильер, срока эксплуатации экструдера, увеличению затрат на производство твёрдого топлива. Ресурс отмеченных выше деталей составляет сотни часов. Поэтому повышение износостойкости экструдера для производства твёрдого топлива из растительного сырья является актуальной задачей.

Растительное сырьё, которое используется для производства топливных брикетов, содержит минеральные частицы (песок, грунт) [1], что при контакте с рабочими органами приводит к механическому разрушению трущихся поверхностей в результате режущего или царапающего действия, вызывая абразивное изнашивание. Для экструдера такой вид изнашивания характерен для зоны сжатия [2], наиболее склонны к абразивному изнашиванию последние два витка хвостовика экструдера [3].

Опыт эксплуатации экструдера показывает, что более быстрому изнашиванию подвержена поверхность последних витков шнека, на которой возникают зоны деформации и окисные плёнки, которые образовались в результате взаимодействия абразивных частиц с материалом поверх-

а Харьковський національний технічний університет сільськогосподарського господарства ім. Петра Василенка. Україна, 61002, г. Харьков, ул. Алчевських, 44.

б Національний університет громадянської захисту України. Україна, 61002, г. Харьков, ул. Алчевських, 44а.

+ Автор, с которым следует вести переписку. e-mail: tsembalbogdan@ukr.net.

ности [4]. Зола, которая образовалась при окислении продукта и состоящая из минеральных веществ, также приводит к абразивному изнашиванию [2].

Под действием высокой температуры, освобождённой влаги и слабокислой среды биомассы, происходит химическая реакция с поверхностью металла, которая провоцирует коррозионно-механическое изнашивание [5]. Процессы, происходящие на поверхностях трения трибосистем при коррозионно-абразивном изнашивании, исследованы авторами работ [6, 7]. Продукты химического взаимодействия кислот с металлом, которые удаляются с поверхности рабочих органов в процессе работы, также приводят к коррозионно-механическому изнашиванию.

Автором работы [8] доказано, что органические кислоты, взаимодействуя со сталями или чугунами, образуют микрогальванические пары, которые вызывают межкристаллическую электрохимическую коррозию. Слои, которые образуются во время поляризации, а также пассивирующие плёнки, непрерывно удаляются с поверхности металла при трении по ней измельчённой биомассы, что значительно увеличивает коррозию.

Биомасса, которая используется для производства топливных брикетов и пеллет, имеет низкую влажность, до 10%. Высокая температура до 450°C и давление, которые возникают на поверхности металла при прессовании биомассы, приводят к пиролизу, а продукты, которые выделяются во время него, влияют на протекание коррозионных процессов.

Рабочей гипотезой данного исследования является то, что для предупреждения возникновения коррозионных процессов под влиянием органических кислот, необходимо определить количество щелочи для их нейтрализации и создать определённую слабощелочную среду, при которой возникает низкая скорость изнашивания и увеличивается ресурс рабочих органов экструдера.

Экспериментальные исследования имели целью определить влияние активной кислотности pH, абразивности и нагрузки, которые являются основными факторами при прессовании растительного сырья, на скорость изнашивания рабочих органов шнекового экструдера для производства топливных брикетов. При этом, практической задачей данного исследования явилось выбор совместимых материалов для изготовления шнека и фильеры, которые будут работать в кислотной, щелочной и абразивной среде.

**Цель работы** — с помощью физического моделирования и микрорентгеноспектрального анализа исследовать трибологические характеристики различных конструкционных материалов, подтвердить характер протекания коррозионных и абразивных процессов на поверхностях трения при использовании различных сред, определить наиболее износостойкую трибосистему, исследовать толщину защитных плёнок, глубину царапин и шероховатость поверхностей трения модельных трибосистем экструдеров EB-350 и EB-350-50M.

**Материалы и методы исследований.** Объект исследования — процессы трения и изнашивания в трибосистемах шнековых экструдеров, работающих в условиях кислотной и абразивной среды.

Экспериментальные исследования выполнялись на машине трения, что дало возможность определить скорость изнашивания перспективных трибосистем в уменьшенном масштабе с учётом особенностей материалов, рабочих режимов и среды. Испытания по определению скорости изнашивания выполняли по схеме “кольцо—кольцо”, размеры и форма образцов для модельных трибосистем были по ГОСТ 30480–97. При этом коэффициент взаимного перекрытия  $K_{вз} = 0,2$ . Испытания проводились при нагрузке от 800 Н до 1200 Н и скорости скольжения 0,5 м/с. Время испытаний составило 10–30 минуты с предварительной приработкой образцов. Шероховатость поверхностей трения образцов составила  $R_a = 0,20$  мкм, при этом выполнялся контроль сопряжения торцевых поверхностей трения по величине контактной площади, которая должна быть не менее 90% рабочей поверхности любого образца.

Для определения величины износа был выбран метод искусственных баз, благодаря которому можно определить линейный износ всех элементов трибосистемы. Данный метод регламентируется ГОСТ 23.301–78. Главным отличием методики, которая была использована, является примене-

ние алмазного конуса с углом при вершине  $120^\circ$ , вместо квадратной алмазной пирамиды с углом при вершине между противоположными гранями  $136^\circ$ .

Металлографические исследования проводились с использованием метода растровой электронной микроскопии (РЭМ), с помощью автоэмиссионного растрового электронного микроскопа модели JSM-7001F (JEOL). Благодаря использованию в нём электронной пушки с полевой эмиссией (катодом Шоттки) (T-FE), современной технологии формирования изображения и компьютерной технологии, была возможность не только наблюдать тонкие структуры поверхности образца с высоким разрешением, но и выполнить локальный анализ элементного состава методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX).

Для определения толщины защитных окисных плёнок на поверхности трения использован способ [9], при котором для оценки их состава и толщины проводили микрорентгеноспектральный анализ с использованием заранее определённого диаметра пятна зонда. Компоненты и их долю, содержащиеся в плёнке, образованной при трении с введением модифицирующих добавок, оценивали по всей площади, соответствующей пятну измерительного зонда.

Для определения глубины царапин на поверхностях трения использовали методику, описанную авторами работы [10]. Глубину царапин определяли при помощи микрорентгеноспектрального анализа на основании содержания железа и доли примесей, которые расположены в таких «карманах».

Шероховатость поверхности образцов трибосистем определялась с помощью портативного измерителя шероховатости TR 100 (UIT), согласно ГОСТ 2789–73.

**Результаты исследований и их обсуждение.** На рис. 1 изображены экспериментальные зависимости скорости изнашивания при изменении уровня активной кислотности pH. Испытания проводились при постоянной нагрузке 1000 Н и абразивности 0%. Растительное сырьё для производства твёрдого топлива имеет слабокислую среду и активную кислотность pH 5. При таких условиях рейтинг исследуемых трибосистем, в сторону увеличения скорости изнашивания, имеет следующий вид; сталь 95X18 и чугун ЧХ32; сталь 40X10C2M и чугун ЧХ32; сталь 95X18 и чугун ЧХ22H2 и на последнем месте сталь 40X и чугун ЧХ28.

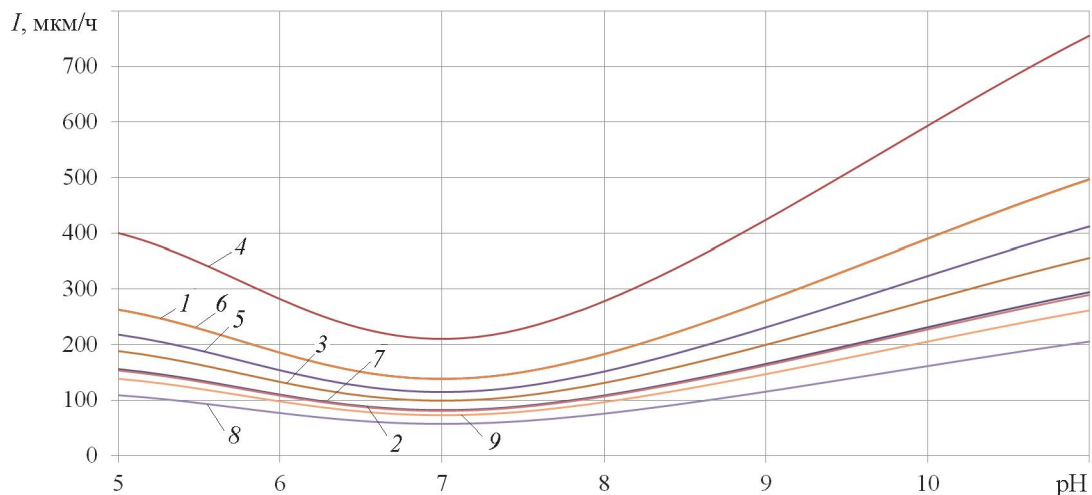


Рис. 1. Экспериментальные зависимости скорости изнашивания трибосистем от уровня активной кислотности при постоянной нагрузке и абразивности 0%: 1 — сталь 40X и чугун ЧХ22H2; 2 — сталь 95X18 и чугун ЧХ22H2; 3 — сталь 40X10C2M и чугун ЧХ22H2; 4 — сталь 40X и чугун ЧХ28; 5 — сталь 95X18 и чугун ЧХ28; 6 — сталь 40X10C2M и чугун ЧХ28; 7 — сталь 40X и чугун ЧХ32; 8 — сталь 95X18 и чугун ЧХ32; 9 — сталь 40X10C2M и чугун ЧХ32

При добавлении к сырью щёлочи — гидроксида натрия до pH 7,4, происходит уменьшение скорости изнашивания. Рейтинг трибосистем остаётся без изменений. При дальнейшем добавлении щёлочи, создаётся сильнощелочная среда, pH 11 и происходит обратный процесс, при кото-



ром возрастает скорость изнашивания. При таких условиях рейтинг трибосистем в сторону увеличения скорости изнашивания имеет вид: сталь 95X18 и чугун ЧХ32; сталь 40X10C2M и чугун ЧХ32; сталь 95X18 и чугун ЧХ22Н2 и на последнем месте сталь 40X и чугун ЧХ28. Экспериментальным путём установлено, что наименьшее значение скорости изнашивания и силы трения характерно для всех трибосистем при рН 7,4.

Анализ изменения величины скорости изнашивания при изменении одного фактора рН позволил установить, что скорость изнашивания может увеличиваться в 3,57 раза от минимальной. Это позволяет сделать практический вывод о добавлении щелочи в кислую среду перед прессованием биомассы, что позволит увеличить ресурс шнека и фильеры.

На рис. 2 представлены зависимости скорости изнашивания от изменения абразивности растительной биомассы  $A_{абр}$ , при постоянной нагрузке 1000 Н, и нейтральном уровне активной кислотности рН 7,4. Растительное сырьё для производства твёрдого топлива имеет абразивность в пределах 8–10% по массе. При таких условиях рейтинг трибосистем в сторону увеличения скорости изнашивания имеет вид: трибосистема сталь 95X18 и чугун ЧХ32; сталь 40X10C2M и чугун ЧХ32; сталь 95X18 и чугун ЧХ22Н2 и на последнем месте сталь 40X и чугун ЧХ28.

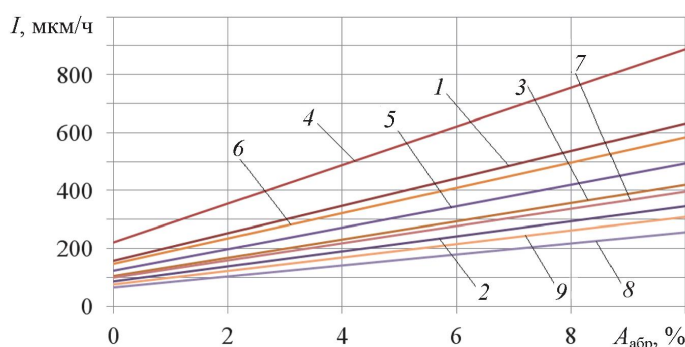


Рис. 2. Экспериментальные зависимости скорости изнашивания трибосистем от абразивности при постоянной нагрузке и активной кислотности: 1 — сталь 40X и чугун ЧХ22Н2; 2 — сталь 95X18 и чугун ЧХ22Н2; 3 — сталь 40X10C2M и чугун ЧХ22Н2; 4 — сталь 40X и чугун ЧХ28; 5 — сталь 95X18 и чугун ЧХ28; 6 — сталь 40X10C2M и чугун ЧХ28; 7 — сталь 40X и чугун ЧХ32; 8 — сталь 95X18 и чугун ЧХ32; 9 — сталь 40X10C2M и чугун ЧХ32

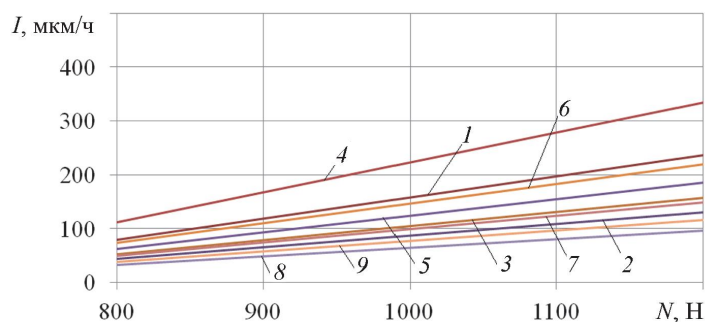


Рис. 3. Экспериментальные зависимости скорости изнашивания трибосистем при изменении нагрузки при постоянной активной кислотности и абразивности: 1 — сталь 40X и чугун ЧХ22Н2; 2 — сталь 95X18 и чугун ЧХ22Н2; 3 — сталь 40X10C2M и чугун ЧХ22Н2; 4 — сталь 40X и чугун ЧХ28; 5 — сталь 95X18 и чугун ЧХ28; 6 — сталь 40X10C2M и чугун ЧХ28; 7 — сталь 40X и чугун ЧХ32; 8 — сталь 95X18 и чугун ЧХ32; 9 — сталь 40X10C2M и чугун ЧХ32

При очистке растительного сырья от абразивных примесей до 0%, происходит уменьшение скорости изнашивания и силы трения. Анализ изменения величины скорости изнашивания при изменении одного фактора  $A_{абр}$ , позволил установить, что скорость изнашивания может увеличиваться в 4,28 раза от минимальной. Это позволяет сделать практический вывод об удалении абразивных примесей из биомассы перед прессованием, что позволит увеличить ресурс шнека и фильеры.

На рис. 3 представлены зависимости скорости изнашивания при изменении нагрузки  $N$  при постоянной абразивности 0%, нейтральном уровне активной кислотности pH 7,4. Из анализа представленных зависимостей следует, что рейтинг трибосистем по скорости изнашивания в сторону увеличения имеет аналогичный вид, который представлен выше.

Анализ изменения величины скорости изнашивания при изменении одного фактора  $N$  позволил установить, что скорость изнашивания может увеличиваться в 3 раза от минимальной.

На основании проведённых исследований можно утверждать, что существует оптимальное значение активной кислотности, равное pH 7,4, которое необходимо обеспечивать перед прессованием путём добавления щелочи в биомассу. При данном значении активной кислотности будет обеспечиваться наименьшее значение скорости изнашивания трибосистем экструдера.

Установлен рейтинг влияния факторов на процесс изнашивания, к которым в порядке убывания, относятся абразивность, активная кислотность среды и нагрузка.

С учётом полученного рейтинга можно обосновать выбор совместимых материалов в трибосистеме экструдеров — сталь 95X18 и чугун ЧХ32, которые позволяют повысить их ресурс.

Используя метод определения толщины защитных плёнок, которые формируются при трении [9], микрорентгеноспектральным анализом была определена их средняя толщина. Плёнки формируются в процессе трения под влиянием среды, в которой работают детали экструдеров для производства топливных брикетов. Результаты измерения толщины защитных плёнок от уровня активной кислотности на поверхности трибоэлементов представлены на рис. 4, а.

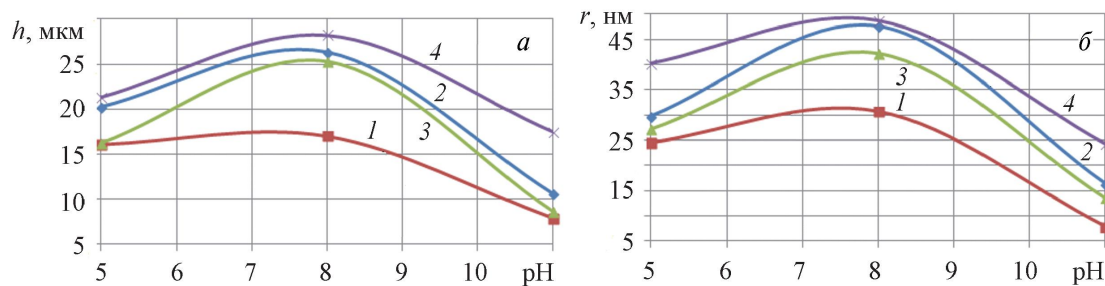


Рис. 4. Зависимости толщины защитных плёнок  $h$  и глубины царапин поверхностей трения образцов модельных трибосистем экструдера ЕВ-350 и ЕВ-350-50М от уровня активной кислотности с содержанием абразива 10% в массе: а — от толщины защитных плёнок  $h$ ; б — глубины царапин  $r$ ; 1 — сталь 40Х; 2 — сталь 95Х18; 3 — чугун ЧХ22Н2; 4 — чугун ЧХ32

Из представленных зависимостей можно сделать вывод, что наибольшую толщину защитной плёнки имеют поверхности трения трибосистемы сталь 95Х18 и чугун ЧХ32, которая формируется при уровне активной кислотности pH 7,4.

С помощью способа, который разработан авторами работы [10], была определена средняя глубина царапин, которые формируются во время абразивного изнашивания. Глубина царапин была рассчитана на основании содержания железа с помощью микрорентгеноспектрального анализа и доли присадки, которая содержит кислород и накапливается в царапинах. Зависимости изменения глубины царапин от уровня активной кислотности при содержании абразива 10% в массе приведены на рис. 4, б.

Как следует из представленных зависимостей максимальная глубина царапин соответствует pH 7,4, когда толщина плёнок максимальна. Это объясняется рыхлым строением сформированных плёнок. Такой вывод можно подтвердить изменением шероховатости поверхностей трения.

Шероховатость рабочих поверхностей трения модельных трибосистем определялась при использовании слабощелочной рабочей среды по сравнению с слабокислой и сильнощелочной, с абразивом и без абразива.

Во время коррозии на рабочих поверхностях образуется рыхлая структура, твёрдость которой выше, чем твёрдость материала поверхности, а продукты коррозии и частицы плёнок, которые отделяются от поверхностей трения, провоцируют абразивный износ, режут и царапают поверхности

трения. Это приводит к увеличению шероховатости рабочей поверхности трения. При использовании слабощелочной среды рН 7,4, в которой нет абразива, наблюдается уменьшение шероховатости поверхностей трения по сравнению с шероховатостью рабочих поверхностей при использовании слабокислой рН 5 или сильнощелочной рабочей среды рН 11.

Наименьшее значение шероховатости рабочих поверхностей трения имеет трибосистема сталь 95X18 и чугун ЧХ32. Для сравнения на рис. 5 представлены кривые для базовой трибосистемы сталь 40X и чугун ЧХ22Н2, которая согласно конструкторской документации применяется в экструдерах EB-350 и EB-350M.

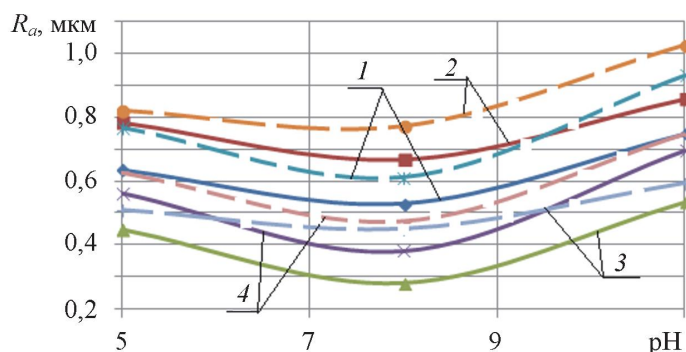


Рис. 5. Зависимости шероховатости рабочих поверхностей трения образцов модельных трибосистем экструдера EB-350 и EB-350M от уровня активной кислотности: сплошные линии — без абразива; пунктир — с абразивом 10% в массе; 1 — сталь 40 X; 2 — чугун ЧХ22Н2; 3 — сталь 95X18; 4 — чугун ЧХ32

**Выводы.** Экспериментальным путём установлено, что растительное сырьё для производства твёрдого топлива имеет слабокислую среду и активную кислотность рН 5. При добавлении к сырью щёлочи — гидроксида натрия, происходит увеличение рН, что приводит к уменьшению скорости изнашивания. При дальнейшем добавлении щёлочи создаётся сильнощелочная среда и происходит обратный процесс, при котором увеличивается скорость изнашивания.

Установлено, что наименьшую скорость изнашивания при слабощелочной среде рН 7,4, имеет трибосистема сталь 95X18 и чугун ЧХ32, которая превышает по своим трибологическим характеристикам — сталь 40X и чугун ЧХ22Н2 и имеет в 1,75 раза меньшую скорость изнашивания.

Экспериментальным путём получены зависимости скорости изнашивания различных трибосистем при одновременном действии абразивного и коррозионного изнашивания в условиях действия различных сред. Установлен рейтинг влияния факторов на процесс изнашивания, к которым в порядке убывания, относятся абразивность, активная кислотность среды и нагрузка.

С учётом полученного рейтинга выполнено обоснование совместимых материалов в трибосистеме экструдеров — сталь 95X18 и чугун ЧХ32, которые позволяют повысить их ресурс.

Проведёнными исследованиями установлено, что при использовании сырья, которое имеет слабощелочную среду, близкую к нейтральной, на рабочих поверхностях наблюдаются незначительные следы коррозии, что связано с образованием на поверхности металла пассивных плёнок, которые замедляют диффузию кислорода к поверхности металла и каталитически снижают скорость коррозии.

### Обозначения

рН — водородный показатель; РЭМ — растровая электронная микроскопия; EDX — энергодисперсионная рентгеновская спектрометрия (Energy-dispersive X-ray spectroscopy); T-FE — катод Шоттки;  $h$  — толщина защитной плёнки, нм;  $r$  — глубина царапины, нм;  $R_a$  — шероховатость поверхности, мкм;  $K_{вз}$  — коэффициент взаимного перекрытия;  $I$  — скорость изнашивания, мкм/ч;  $A_{абр.}$  — содержание абразива (абразивность), %;  $N$  — нагрузка, Н.

### Литература

1. **Войтов В.А., Цимбал Б. М.** Розробка методики та визначення вмісту мінеральних (абразивних) домішок, які контактують з робочими органами екструдера // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. — Харків: ХНТУСГ. — 2016, № 4, 56—61
2. **Деркач В. В.** Повышение износостойкости цилиндра экструдера методом термодиффузионного биметализации: автореф. дис. ... канд. тех. наук. — Киев. — 2000
3. **Гончар В. А.** Исследование износостойкости азотированного стали X12 в коррозионно-абразивной среде // Тез. докл. VIII украинско-польской конф. молодых ученых “Информатика и механика”. — Хмельницкий. — 2011, 45—46
4. **Васильков В. В., Радык Д. Л.** Виды износа спиралей винтовых рабочих органов // Вестник ХНТУСХ. — Харьков: ХНТУСХ. — 2010, № 100, 197—202
5. **Прейс Г. А.** Об износе деталей шнекпрессов // Известия высших учебных заведений “Пищевая технология”. — Краснодар: Кубанский государственный технологический университет. — 1961, № 5, 117—119
6. **Zheng Z., Wang Z., and Huang W.** Influence of Load and Sliding Distance on the Micro-Scale Abrasive Wear behavior of TZNT Alloy // Journal of the Chinese Advanced Materials Society. — London: Taylor & Francis. — 2016 (4), no. 1, 82—90
7. **Sosa D. A., Rosales C. S., Boeri R. E., and Simison S. N.** Corrosion Mechanisms in ADI Parts // International Journal of Cast Metals Research. — London: Taylor & Francis. — 2016 (29), nos. 1—2, 106—111
8. **Моисеев А. В.** Износостойкость дереворежущего инструмента. — М.: Лесная промышленность. — 1981
9. **Способ определения толщины защитных оксидных пленок, формируемых при трении:** пат. Украины № 107500, МПК G01B 21/08. — Бюл. — 2016, № 11 / Т. С. Скобло, А. Ю. Марченко, О. И. Сидашенко, И. М. Рыбалко, Е. А. Сатановский, А. К. Олейник, А. В. Марков
10. **Энергосберегающий способ повышения износостойкости изделий модифицирования масла вторичного сырья:** пат. Украины № 108224, МПК C10M 101/00. — Бюл. — 2016, № 13 / Т. С. Скобло, А. Ю. Марченко, О. И. Сидашенко, И. М. Рыбалко, А. А. Гончаренко, Е. А. Сатановский, А. К. Олейник, А. В. Марков

*Поступила в редакцию 28.12.17.*

*После доработки 05.09.18.*

*Принята к публикации 10.09.18.*

**Vojtov V. A. and Tsymbal B. M. Study of Tribological Characteristics of Compatible Materials in Tribosystems of Extruders for Obtaining Solid Fuel from Biomass.**

This paper presents the results of the study of the tribological characteristics of compatible materials, the thickness of the protective film, the depth of scratches and roughness of the friction surfaces of samples of the model tribosystems of the EB-350 and EB-350M extruder for obtaining solid fuel from biomass. It has been found that when an alkaline additive agent is added in the form of sodium hydroxide, creating a slightly alkaline medium pH 7.4, the wear rate decreases and the service life of the screw and die extruder increases. It has been found that, with a slightly alkaline medium pH 7.4, the roughness of the working friction surfaces is less than the roughness of surfaces with a weak acid medium of pH of 5 and a strongly alkaline medium of pH 11. The rating of impact of the factors in the wear process is determined, which in a descending order includes abrasiveness, active acidity of the medium and load. Taking into account the rating received, the compatibility of materials in the tribosystems of extruders, i.e. steel 95X18 and cast iron ЧХ32, which allow to increase their resource, is justified. It has been established that when using raw materials that have a slightly alkaline medium close to neutral, there are insignificant traces of corrosion on the working surfaces, which is associated with the formation of passive films on the metal surface that slow the diffusion of oxygen to the surface of the metal and catalytically reduce the rate of corrosion.

**Keywords:** tribosystems of extruders, plant biomass, corrosion mechanical wear, acidity of biomass, wear rate, compatibility of materials in a slightly alkaline medium.