

УДК 621.9.029:674.05

Е.А. Памфилов, С.В. Лукашов, Я.С. Прозоров

Брянская государственная инженерно-технологическая академия

Памфилов Евгений Анатольевич родился в 1941 г., окончил в 1964 г. Брянский институт транспортного машиностроения, доктор, профессор, зав. кафедрой оборудования лесного комплекса и технического сервиса Брянской государственной инженерно-технологической академии, засл. деятель науки РФ. Имеет более 400 печатных работ в области обеспечения долговечности машин и оборудования.
E-mail: pamfilov@bgita.ru



Лукашов Сергей Викторович родился в 1977 г., окончил в 1999 г. Брянский государственный педагогический университет, кандидат химических наук, доцент кафедры химии Брянской государственной инженерно-технологической академии. Имеет более 60 печатных работ.
E-mail: mail@bgita.ru



Прозоров Ярослав Сергеевич родился в 1983 г., окончил в 2007 г. Брянский государственный технический университет, аспирант, старший преподаватель кафедры оборудования лесного комплекса и технического сервиса. Имеет более 10 печатных работ.
E-mail: prozorov@bgita.ru



МОДЕЛЬ МЕХАНОХИМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУЖКИ

Рассмотрены особенности механизмов изнашивания функциональных поверхностей деталей оборудования для производства технологической стружки в зависимости от условий эксплуатации; исследованы механические, тепловые, химические и электрохимические явления при трении системы «металл – древесина».

Ключевые слова: механохимическое разрушение, коррозионно-механическое изнашивание, трибокоррозия, трибодеструкция, стружечный станок, хелаты, металлоорганические соединения, минеральные компоненты древесины.

Модернизация отечественной деревообрабатывающей промышленности предполагает более полное использование лесосырьевых ресурсов, достижение высокой энергоэффективности современных предприятий, выпуск высококачественной конкурентоспособной продукции.

В полной мере сказанное относится и к производству широко востребованных на рынке лесопродукции древесностружечных плит (ДСтП), при изготовлении которых эффективность производства во многом зависит от состояния оборудования и используемых инструментов. Поэтому обеспечение их высокой надежности приобретает особое значение.

© Памфилов Е.А., Лукашов С.В., Прозоров Я.С., 2012

Технико-экономические показатели производства ДСтП (расход древесного сырья и связующих, энергозатраты, качество производимой продукции и др.) в значительной мере формируются уже на стадии производства технологической стружки.

Для ее изготовления широко используются стружечные станки с ножевым валом, потеря работоспособного состояния которых связана с достижением предельного износа рабочих поверхностей ножевого вала и некоторых других деталей режущего узла. Важным является выбор износостойких материалов для их изготовления и эффективной технологии упрочнения изнашивающихся поверхностей.

Для успешного выполнения указанных условий необходимо выявление закономерностей изнашивания рассматриваемых функциональных поверхностей, на основании чего становится возможной разработка путей снижения износа.

Анализ основных физико-химических процессов для рассматриваемых узлов трения преобладающим признал коррозионно-механический вид изнашивания, или трибокоррозию [1,3,7]. Он представляет собой процесс поверхностного разрушения конструкционных и инструментальных материалов при совместном действии механических нагрузок и химических реакций внешней среды. Для трибокоррозии характерен эффект совместного влияния (синергизм) механических и химических явлений, результат проявления которых не может быть определен простым суммированием эффектов отдельных составляющих.

Механизм изнашивания рассматриваемых поверхностей может быть представлен как совокупность коррозионных процессов окисления (химического и электрохимического) и процессов разупрочнения, разрыхления и разрушения поверхностей трения с параллельно текущей газификацией поверхностных слоев.

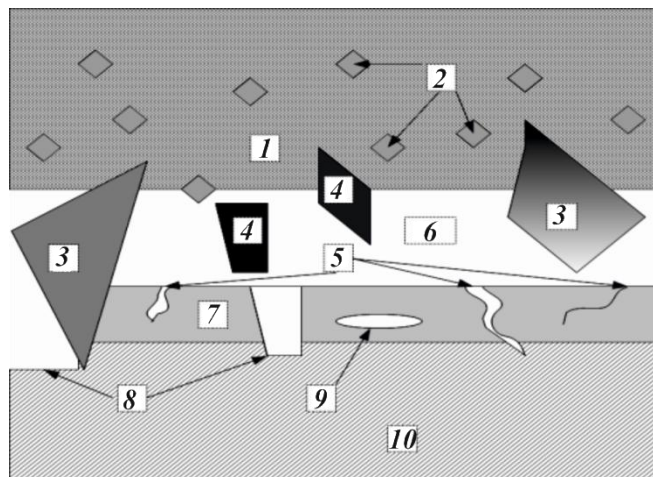
Разработанная нами схема контактного взаимодействия рабочих поверхностей ножевого вала и перерабатываемой древесины представлена на рис. 1.

Согласно этой схеме процесс изнашивания металлических поверхностей, фрикционно контактирующих с древесиной, включает в себя три основных этапа:

- образование слоев оксидов на рабочих поверхностях вала;
- механохимическое разрушение образовавшихся слоев;
- взаимодействие древесного сырья с образовавшейся ювенильной поверхностью металла и его репассивация.

На поверхности металла изначально находится слой оксидов, который образуется при взаимодействии металла с кислородом воздуха. Этот тонкий слой прочно связан с поверхностью металла и повторяет его топографию. Толщина оксидной пленки для железоуглеродистых сплавов составляет $10^{-7} \dots 10^{-8}$ м.

Рис. 1 Схематическое изображение фрикционного контакта поверхности ножевого вала и древесины: 1 – древесина; 2 – естественные абразивные частицы древесины; 3 – внешние абразивные частицы; 4 – диспергированные частицы материала вала; 5 – зоны коррозионного разрушения; 6 – агрессивная внешняя среда; 7 – оксидный слой; 8 – ювенильная поверхность металла; 9 – область молизаии водорода; 10 – исходный металл ножевого вала



Оксидная пленка состоит из вюстита FeO (оксид железа(II)), магнетита Fe_3O_4 и гематита Fe_2O_3 (оксид железа(III)). Непосредственно к металлу примыкает FeO , далее следуют Fe_3O_4 и Fe_2O_3 . Соотношение толщин оксидов $\text{FeO} : \text{Fe}_3\text{O}_4 : \text{Fe}_2\text{O}_3$ близко к 100:10:1 [8].

Свойства оксидов значительно отличаются от свойств металлической основы. Оксиды при стандартной температуре обычно твердые, хорошо сопротивляющиеся сжатию, однако они достаточно хрупкие, при повышении температуры их пластичность повышается.

Указанные оксиды имеют кристаллическое строение, они теплопроводны, являются электрическими изоляторами, а коэффициент их линейного расширения меньше, чем у самого металла. Пленки таких оксидов способны пассивировать и защищать поверхности рассматриваемых рабочих органов от поверхностного разрушения.

На втором этапе фрикционного контакта металла и древесины, в результате протекания сложного комплекса химических и механических воздействий, защитная пленка разрушается, что и обуславливает процесс изнашивания. Исследователями отмечено [7], что характер механохимического механизма изнашивания в значительной степени определяется условиями внешнего воздействия, при этом вклад химических факторов вполне сопоставим с ролью механических.

Кроме того, механизм изнашивания усугубляется тем, что при высоких давлениях и температуре в зоне фрикционного взаимодействия древесина может разлагаться. В начале процесса разложения при температуре 100...150 °C испаряется свободная влага, происходит разложение гемицеллюлоз (275...300 °C) и распад древесного волокна (~400 °C), сопровождающийся выделением кислот, спиртов и смол [1, 3].

Поэтому, кроме оксидов, на контактирующих поверхностях формируются адсорбированные слои химических соединений, образовавшихся при

трибодеструкции древесины, в совокупности с полярными молекулами полимерных органических соединений, свободными радикалами и экстрактивными веществами. Согласно ряду исследований [1, 3, 9, 10, 12], среди разнообразных химических соединений, выделяющихся в процессе контакта стале́й с древесиной, наибольшее влияние на характер и интенсивность изнашивания оказывают вода, карбоновые кислоты и полифенольные соединения.

Наличие воды в нужном количестве является основополагающим фактором для коррозионной реакции металла с древесиной. Относительная влажность древесного сырья, применяемого в стружечных станках, не должна быть менее 65 %, ее снижение приводит к ухудшению качества стружки. Известно, что при влажности древесины, превышающей 75 %, ее коррозионная активность резко возрастает [11]. Вода попадает на поверхность металла непосредственно из древесины в процессе контакта или конденсируется из паров, выделяющихся из нее, и активно адсорбируются поверхностными слоями металла.

В водном растворе всегда содержатся ионы H^+ и OH^- как продукты частичного распада воды, а также определенное количество кислорода O_2 . При контакте с таким раствором коррозия сплава на основе железа протекает в условиях образования микрогальванического элемента. Также необходимо отметить, что вал (или диск) и продукты деструкции древесины взаимодействуют в постоянно обтекающем их воздухе, поэтому в данном случае водный раствор всегда содержит достаточное количество растворенного кислорода.

Водный раствор, содержащий ионы H^+ и OH^- , а также растворенный O_2 и другие вещества, активизирует коррозию, которая может быть выражена уравнениями следующих процессов:

анодный



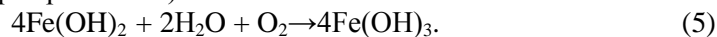
катодный с водородной деполяризацией



катодный с кислородной деполяризацией



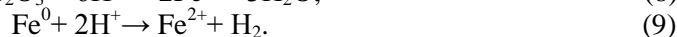
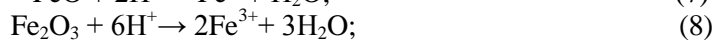
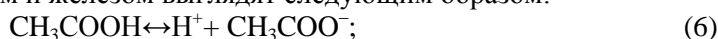
Гидроксид железа(II) – $Fe(OH)_2$ (белая ржавчина) образует на поверхности металла диффузионно-барьерный подсло́й, через который должен диффундировать кислород. На внешней поверхности оксидной пленки, доступной растворенному кислороду, гидроксид железа(II) окисляется в гидроксид железа(III) – $Fe(OH)_3$ (бурая ржавчина):



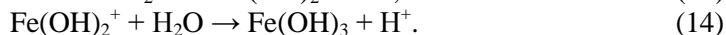
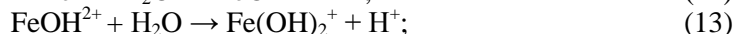
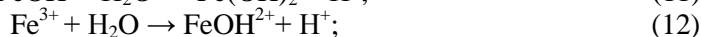
Пленки ржавчины, покрывающей металл рыхлым слоем, состоят из слоев гидроксидов железа, состав которых может быть выражен общей формулой $nFe(OH)_2 \cdot mFe(OH)_3 \cdot gH_2O$, где n , m , g – целые числа. Ржавчина

обладает плохим сцеплением с металлической поверхностью, плохо защищает ее от коррозии и легко удаляется при механических воздействиях непосредственно в процессе эксплуатации деревообрабатывающих станков.

Этот процесс усиливается коррозионным действием карбоновых кислот. Химическое взаимодействие металла с продуктами деструкции древесины интенсифицируется действием эксплуатационных локальных повышенных температур. Это связано с тем, что при увеличении температуры существенно возрастает скорость химических реакций, которые быстрее протекают в кислой, чем в щелочной или нейтральной средах. Отметим, что рН древесины умеренных широт, используемой для переработки, находится в интервале от слабокислого до умеренно кислого (рН 6,4 ... 3,3), наличие в составе перерабатываемого сырья коры дополнительно снижает кислотный потенциал. Поэтому образовавшиеся в процессе трибодеструкции древесины карбоновые кислоты (уксусная, муравьиная, пропионовая и некоторые другие) активно взаимодействуют с оксидной пленкой на поверхности вала, растворяя ее. Протекающие при этом реакции, например, уксусной кислоты с вюститом, магнетитом и железом выглядят следующим образом:



Образующиеся ионы Fe^{2+} и Fe^{3+} подвергаются гидролизу:



Кроме того, возрастание скорости коррозии металла по мере уменьшения рН обусловлено не только увеличением скорости выделения водорода, но и облегченным доступом кислорода к поверхности металла вследствие растворения поверхностного оксида и, следовательно, повышенной кислородной деполаризацией [6]. Катализаторами коррозионной активности могут быть сульфаты и хлориды, обнаруженные в достаточном количестве в составе минеральных компонентов древесины. Также возможно образование на поверхности ножевого вала микрогальванических пар между структурными составляющими инструментального материала, приводящее к межкристаллитной коррозии. В зоне фрикционного контакта «древесина–сталь» исследователями [1, 9] отмечены явления электризации поверхностей с образованием пьезо- и трибозарядов и последующими токами нейтрализации и искровыми микро-разрядами.

Высокую химическую активность при контакте с металлами проявляют и полифенолы (пирокатехин и пирогаллол) и их производные (главным образом таннины), которые в значительном количестве содержатся в древесине и коре ряда пород, хотя роль реакций железа с этими веществами в суммарном химическом износе значительно меньше кислотных реакций.

диссоциации различных веществ, но и в результате сложных химических реакций, в которых принимают участие компоненты древесины и продукты ее разложения (органические кислоты, углеводороды, спирты, альдегиды и др). Исследования пары трения «древесина–сталь» выявили следующий состав образовавшихся неконденсировавшихся газов, %: H_2 – 4,2...6,0; CH_4 – 2,0; CO – 70,0...72,0; CO_2 –20,0 [1].

Среди многочисленных теорий, объясняющих водородное изнашивание, можно выделить три, подтвержденных экспериментальными исследованиями: теория адсорбции, теория декогезии, теория внутреннего давления [1, 2].

Теория адсорбции связывает водородное изнашивание с понижением поверхностной энергии металла в результате адсорбции ионов водорода, образующихся при диссоциации кислот и в ходе реакций с продуктами деструкции древесины, и с уменьшением сил, необходимых для развития трещин. В этом случае водород действует как поверхностно-активное вещество, которое, адсорбируясь на поверхности микротрещин, в местах выхода на поверхность дислокаций, межфазовых границ, неупорядоченных образований и в других дефектах, особенно у острых вершин, существенно понижает механическую прочность твердых тел в процессе их деформации.

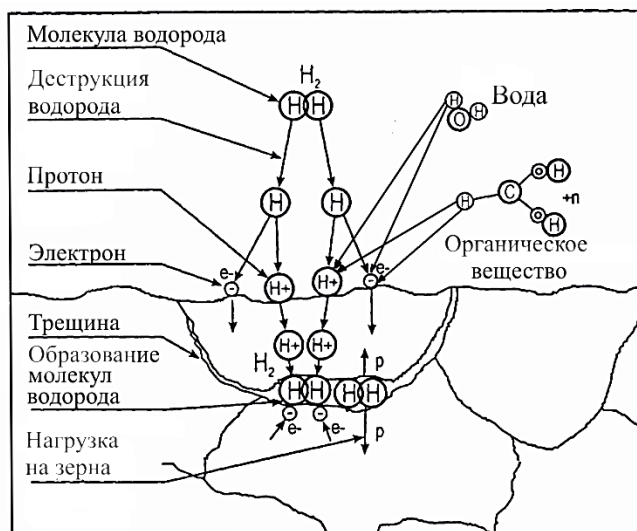
Теория декогезии предполагает, что растворенный водород при высоких концентрациях понижает максимальную силу когезии между атомами металла в кристаллической решетке, по границам зерен и в поверхностях. Разрушение связей происходит, когда локальное напряжение оказывается равным сниженной за счет водорода когезии.

Теория внутреннего давления объясняет механизм водородного изнашивания следующим образом. При достаточно большой концентрации водорода состояние насыщения решетки металла водородом достигается сравнительно быстро. Затем ионы водорода частично выходят из пересыщенной решетки стали в межзеренное пространство или на поверхности микротрещин, пустот, неметаллических включений, где при сравнительно невысокой температуре происходит молизация водорода (рис. 2). Вследствие этого в замкнутых местах выхода водорода создается высокое давление, приводящее к образованию напряженного состояния в решетке, деформации, нарушению сплошности металла, образованию трещин и расслаиванию [2].

Механическая составляющая износа во фрикционном контакте между древесным сырьем и металлическими поверхностями ножевого вала обусловлена рядом факторов.

Во-первых, попадание в зону контакта частиц минеральных компонентов из почвы с недостаточно очищенной обрабатываемой древесиной. Попадающие частицы почвы обладают зачастую высокой твердостью (в единицах по шкале Мооса): глинозем (оксид алюминия) – 9, кремнезем (диоксид кремния) – 7, что превышает твердость поверхности металла ножевого вала [4].

Рис. 2 Схема наводороживания стальных деталей при фрикционном контакте с древесиной



Во-вторых, попадание абразивных частиц в сопряжения станка из окружающей среды, например из воздуха, в 1 м^3 которого содержится от 0,04 до 5,00 г пыли, на 60...80 % состоящей из взвешенных частиц минералов (кварц, корунд, оксиды и диоксиды кремния, соединения алюминия, кальция и др.).

В-третьих, вовлечение диспергированных частиц износа в зону контакта. Частицы износа металлической поверхности ножевого вала в основном состоят из оксидов железа. При твердости функциональных поверхностей вала около 370 HV твердость вюстита составляет 320 HV, магнетита – 460 HV, гематита – 1030 HV[8].

В-четвертых, свой вклад вносят естественные минеральные компоненты древесины, в первую очередь кремнезем. Однако содержание неорганических включений (SiO_2 , K_2O , Na_2O , MgO , CaO и др.) в древесине умеренных широт, используемой для получения стружки, невысоко, поэтому их вклад в суммарный абразивный износ незначителен [9, 11].

Проведенный анализ закономерностей и уточнение возможных механизмов изнашивания ножевых валов стружечных станков позволяют определить подходы к обоснованию наиболее перспективных технологических методов упрочнения валов, сформулировать требования к выбору способов повышения износостойкости [5] и теоретически обосновать структурно-фазовый состав и физико-химические свойства поверхностного слоя ножевых валов, что позволит существенно повысить долговечность деревообрабатывающего оборудования и инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зотов Г.А., Памфилов Е.А. Повышение стойкости дереворежущего инструмента. М.: Экология, 1991. 304 с.
2. Касаткин Г.Н. Водород в конструкционных сталях. М.: Интермет Инжиниринг, 2003. 336 с.

3. *Мусеев А.В.* Износостойкость дереворежущего инструмента. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 112 с.
4. *Пенкин, Н.С. Пенкин А.Н., Сербин В.М.* Основы трибологии и триботехники: учеб. пособие. М: Машиностроение, 2008. 206 с.
5. *Пилушина Г.А., Памфилов Е.А.* Повышение работоспособности лесопильного оборудования // Лесн. журн. 2007. № 4. С. 85–91. (Изв. высш. учеб. заведений).
6. *Семенова И.В. Флорианович Г.М., Хорошилов А.В.* Коррозия и защита от коррозии. М.: Физматлит, 2002. 336 с.
7. *Сорокин Г.М. Ефремов А.П., Саакян Л.С.* Коррозионно-механическое изнашивание сталей и сплавов. М.: Нефть и газ, 2002. 424 с.
8. Трение и модифицирование материалов трибосистем / Ю.К. Машков, К.Н. Полещенко, С.Н. Поворожнюк, П.В. Орлов. М.: Наука, 2000. 280 с.
9. *Klamecki B.E.* A Review of wood cutting tool wear literature // Электронная библиотека издательства «Springer». Режим доступа: <http://www.springerlink.com/content/v120741328777300/>
10. *Krilov A. Gref R.* Mechanism of sawblade corrosion by polyphenolic compounds // Электронная библиотека издательства «Springer». Режим доступа: <http://www.springerlink.com/content/n15418jl82377147/>
11. *Porankiewicz B. Sandak J., Tanaka C.* Factors influencing steel tool wear when milling wood // Wood Science & Technology. 2005 N 39(3). P. 225–234.
12. *Zelinka, S.L., Stone D.S.* The effect of tannins and pH on the corrosion of steel in wood extracts // Электронная библиотека издательства «Wiley». Режим доступа: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/maco.201005845/>

Поступила 30.05.11

E.A. Pamfilov, S.V. Lukashov, Ya.S. Prozorov
Bryansk State Engineering and Technological Academy

Model of Mechanochemical Destruction of Chip Producing Equipment Parts

Peculiarities of wear mechanisms of functional surfaces of equipment parts for chip production depending on operating conditions have been studied; mechanical, thermal, chemical and electrochemical phenomena in friction of the "metal - wood" system have been investigated.

Key words: mechanochemical destruction, corrosion-mechanical wear, tribocorrosion, tribodestruction, flaker, chelates, organometallic compounds, mineral components of wood.