

УДК 621.575.9:620.197

DOI: 10.30987/article_5be14a33a4b107.67349403

Е.А. Памфилов, Г.А. Пилюшина, В.В. Капустин

ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ ПРИ КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОМ ИЗНАШИВАНИИ

Показаны эффективные пути повышения износостойкости железоуглеродистых сплавов, претерпевающих значительную трансформацию в процессе реализации фрикционно-механического взаимодействия с древесиной. Предложены основные направления формирования функциональных поверхностных слоев, основанные на реализации комплексных подходов, включающих перспективные методы упрочняющей обработки и технологи-

ческого обеспечения благоприятного состояния поверхностных слоев за счет создания защитных покрытий, значительно снижающих коррозионно-механическое изнашивание изделий.

Ключевые слова: износостойкость, железоуглеродистые сплавы, коррозия, изнашивание, трение, функциональные поверхности, упрочняющая обработка.

E.A. Pamfilov, G.A. Pilyushina, V.V. Kapustin

FUNDAMENTALS OF IRON-CARBON ALLOY WEAR-RESISTANCE INCREASE AT CORROSION-MECHANICAL WEAR

Iron-carbon alloy wear intensity at the interaction with wood is caused mainly by the conditions of electro-chemical and chemical reactions in the area of a friction contact, hydrogenation and decarbonization of surface layers, by atmospheric and biological metal corrosion development. At that structural material surface destruction at friction with wood takes place at the expense of the joint and interrelated realization of chemical and mechanical mechanisms.

The analysis of the contact interaction of parts operating surfaces with the wood processed allowed revealing the totality of basic factors defining their resistance to wear both at the expense of corrosion process realization, and owing to a mechanical surface destruction.

To achieve the increased wear-resistance of iron-carbon alloys contacting with wood material it is

necessary to ensure the formation of favorable physical-mechanical characteristics in a surface layer: hardness, impact elasticity, resistance to micro-crack growth, durability to the impact of abrasive corrosive-active environment.

For metal tribo-corrosion prevention the most promising way is strengthening by means of function-directed complex impacts upon surface layers or by volume and surface alloying.

The decrease of stress concentrator quantity and micro-crack growth inhibition may be achieved by the formation of ductile strata between separate areas and also by the possibility to form a favorable level of compressing residual stresses.

Key words: wear-resistance, iron-carbon alloys, corrosion, wear, friction, operating surfaces, strengthening.

На интенсивность протекания процессов изнашивания деталей, контактирующих в ходе эксплуатации с полимерами, в том числе с древесиной, значительное влияние оказывает большое количество факторов, проявляющих свою роль при фрикционно-механическом взаимодействии. Эти факторы могут в существенной мере как повышать, так и способствовать снижению интенсивности изнашивания функциональных поверхностей.

Значительная интенсивность изнашивания в условиях коррозионно-механического взаимодействия металлов с древесиной во многом связана с тем, что

продукты коррозии и вторичные структуры поверхностных слоев зачастую являются менее износостойкими, чем основной металл, на котором они образуются. Они имеют относительно слабую к нему адгезию, что способствует своего рода разрыхлению поверхностного слоя материала деталей и ускоряет их разрушение.

Поэтому решение задачи повышения износостойкости в указанных условиях требует выявления и снижения влияния негативных явлений, наблюдаемых при фрикционном контактом взаимодействии материалов с древесиной, и, наоборот, оп-

тимизации тех свойств, которые способствуют повышению износостойкости.

Выполненный ранее [8] и систематизированный нами анализ особенностей контактного взаимодействия рабочих поверхностей деталей лесозаготовительного и деревоперерабатывающего оборудования с обрабатываемой древесиной позволил выявить совокупность основных факторов, определяющих сопротивляемость их изнашиванию как за счет реализации коррозионных процессов, так и вследствие механического поверхностного разрушающего воздействия (рисунок).

В процессе эксплуатации износостойкость рассматриваемых деталей определяется характеристиками исходного состояния и степенью трансформации поверхностных слоев, происходящей за счет протекания электрохимических и химических реакций в зоне фрикционного контакта, наводороживания и обезуглероживания

поверхностных слоев, развития атмосферной и биологической коррозии металла.

Коррозионное разрушение конструкционных материалов обусловлено совокупностью химических реакций, протекающих по различным механизмам в зоне фрикционного взаимодействия. Идентифицировать преобладающий вид коррозии достаточно сложно. Биологическая природа разрушения металла является еще более сложной.

Однако очевидно, что поверхностное разрушение материала при трении древесиной происходит за счет совместной и взаимосвязанной реализации химического и механического механизмов.

При этом химическое разрушение преимущественно представляет собой результат воздействия на пассивирующую (оксидную) пленку в локальных участках металлической поверхности с последующим развитием питтинговой, интеркристаллитной или щелевой коррозии.

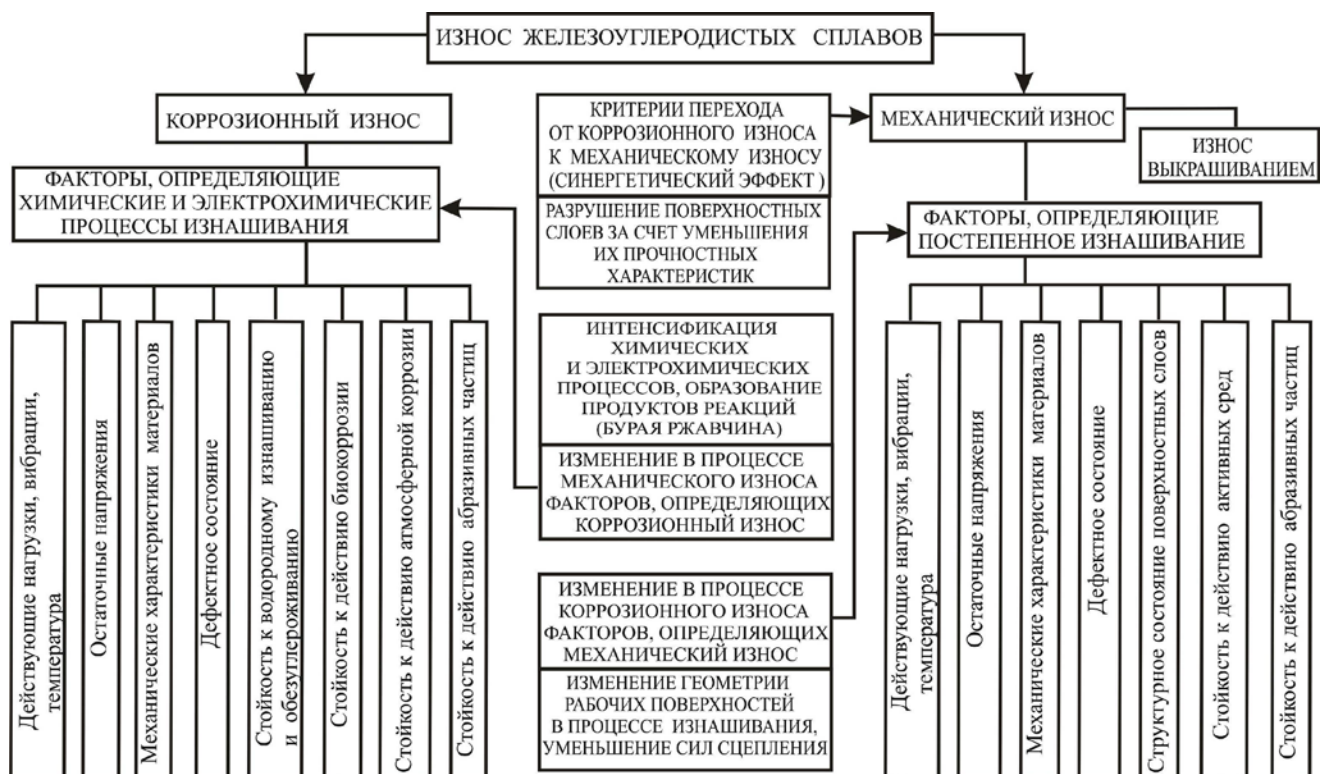


Рис. Совокупность и взаимосвязь факторов, определяющих сопротивляемость износу железоуглеродистых сплавов при контакте с древесиной

Поэтому при фрикционно-механическом контакте с древесиной наиболее перспективной является защита ме-

таллов от трибоккоррозии путем объемного и поверхностного легирования или посредством выполнения функционально-

ориентированной комплексной обработки их поверхностей.

При этом возможна реализация двух подходов к формированию поверхностных слоев:

- создание защитных (пассивирующих) пленок на металлической поверхности применительно к действию тех сред, где предполагается эксплуатация детали;

- обеспечение протекания на триботехнических поверхностях химических реакций, способствующих восстановлению пассивирующей пленки в местах ее разрушения.

Для уменьшения трибокоррозии рекомендуется использование пассивирующих пленок, содержащих труднорастворимые соединения (оксиды, фосфаты, сульфаты, вольфраматы и др.), или нанесение покрытий из металлов, стойких к коррозии (никелирование, хромирование и др.).

Таким образом, их защитное действие реализуется за счет изоляции металла от активной окружающей среды. Существенным недостатком этих методов является возможное удаление поверхностного слоя, в результате чего скорость коррозии на поврежденном месте резко возрастает. Поэтому поверхностное легирование гораздо эффективнее для повышения коррозионной стойкости металла.

Положительные результаты также могут достигаться за счет образования некристаллических (стеклообразных) пленок, наиболее склонных к быстрой репассивации. Такие пленки в отличие от кристаллических не имеют границ зерен, являющихся путями облегченной диффузии к поверхности металла частиц активной среды.

Обеспечение совместимости структур также является важным фактором при образовании некристаллической структуры [3] и для достижения благоприятного уровня взаимодействия на границе окисел-подложка. При этом способность к возникновению такого уровня некристаллическости может быть усилена поверхностно вносимыми легирующими добавками, например хромом. Кроме того, при повышении концентрации хрома на поверхности образуется пассивирующая некристалли-

ческая пленка, обладающая повышенной защитной способностью.

Другим путем создания стеклообразных пассивирующих пленок, обеспечивающих высокую трибокоррозионную стойкость, является эффект аморфизации сплавов. Анализ литературных источников показал, что ток пассивации для аморфного сплава системы Fe–Cr–P–C почти на два порядка меньше, чем для этого же сплава после обычной кристаллизации [2]. Такая способность снижать плотность тока пассивации является следствием способности аморфной пленки уменьшать поток ионов, образующихся в зонах фрикционного взаимодействия.

При динамических нагрузках некристаллические пленки способны длительно сопротивляться разрушению, приводящему к возникновению контактной коррозии или трещинообразованию [5; 9; 10]. По некоторым данным, степень кристаллическости пленки оказывает влияние и на пластичность, зачастую существенно её повышая. Также литературные данные свидетельствуют о том, что скорость повторного роста пленки и эффективность замедления растворения металла увеличиваются, когда на поверхности сплава находится стабильно существующая некристаллическая пленка [1; 2].

Рассмотренные способы повышения стойкости пленки к коррозионному разрушению указывают на то, что эффективные пассивирующие (оксидные) пленки с некристаллической структурой могут играть важную роль в предотвращении коррозии. Вместе с тем очевидно, что необходимы исследования триботехнических возможностей различных способов обработки поверхности, среди которых наиболее перспективными являются:

1) имплантация элементов, способствующих образованию аморфных пленок (например, ионов хрома, никеля, кобальта и молибдена);

2) лазерная закалка и лазерное легирование с созданием слоя аморфного материала, на котором могут формироваться некристаллические пленки;

3) электрическое осаждение покрытий, содержащих компоненты, способст-

вующие образованию аморфных пленок при последующей дополнительной обработке;

4) прямое осаждение стеклообразных оксидных покрытий.

Кроме того, путем нанесения металлических покрытий или ионной имплантации можно изменять потенциал поверхности до величин, обеспечивающих иммунную защиту, или растворять в поверхностных слоях элементы, которые, реагируя с другими растворенными в металле ионами, осаждаются на поверхности и образуют защитный слой.

Механическое разрушение происходит при приложении к детали спектра силовых нагрузок, приводящих к разрушению пассивирующей пленки и созданию условий для воздействия среды на ювенильную поверхность. Это обуславливает развитие коррозии под напряжением, водородного охрупчивания или коррозионной усталости.

В процессе изучения механического изнашивания железистых сплавов при фрикционном контакте с древесиной можно полагать, что износостойкость рассматриваемых деталей определяется главным образом условиями протекания следующих триботехнических процессов:

– разрушение и удаление поверхностных оксидных и расположенных под ними металлических слоев, в том числе под действием абразивных частиц;

– усталостное накопление и рост дефектов и повреждений, возникновение остаточных напряжений, структурная трансформация изнашиваемого материала;

– изменение макро- и микрогеометрических параметров;

– образование продольных и поперечных трещин.

В общем случае механический износ железистых сплавов можно представить как результат постепенного изнашивания и изнашивания путем микровыкрашивания и сколов. Соотношение этих составляющих в общей величине износа может изменяться в широких пределах в зависимости от свойств контактирующих материалов и состояния изнашиваемых поверхностных слоев деталей. Кроме того,

доля каждой из этих составляющих не сохраняется постоянной на протяжении времени эксплуатации исследуемых объектов.

В начальной стадии износ материалов при фрикционно-механическом взаимодействии с древесиной носит преимущественно характер постепенного изнашивания. В этот период изнашивания наблюдается изменение исходной геометрической формы функциональных поверхностей деталей. При этом величина износа пропорциональна величине комплексного параметра, характеризующего действие давлений, скорости и продолжительности контактирования элементарных участков поверхностей изнашивания с древесиной.

По мере увеличения износа деталей и изменения их геометрии интенсивность постепенного изнашивания снижается, так как напряжения от сил трения уменьшаются в связи с распределением их на больших площадях. Одновременно увеличивается диссипация энергии в зоне фрикционного контакта, а следовательно, интенсифицируется и тепловыделение в рассматриваемой области. Активированное состояние поверхностного слоя деталей приводит к взаимодействию его с активными компонентами среды и образованию метастабильных структур, называемых вторичными, которые возникают в результате окислительных, деформационных и других процессов.

При установившемся процессе трения химические соединения кислорода с металлом предохраняют поверхностный слой деталей от износных повреждений. Возрастание силовых и температурных нагрузок, протекание коррозионных процессов, присутствие в зоне контакта абразива и другие негативные воздействия приводят к возрастанию износа.

Изношенные поверхности деталей в результате неравномерного удаления микрообъемов материала зачастую приобретают форму так называемого естественного износа. Это связано с тем, что при установившемся процессе трения и изнашивания устойчивой оказывается та форма изнашиваемой поверхности контакта, которая соответствует минимуму энергетиче-

ческих затрат при заданном относительном движении [8].

Поэтому если в процессе изготовления задавать такую форму деталей, которая обеспечивает минимальные энергетические затраты на трение и предотвращает тем самым возрастание работы, затрачиваемой на разрушение единицы объема материала поверхностных слоев, то можно добиться существенного снижения износа. Немалую роль при этом играет явление структурной приспособляемости, что позволяет управлять условиями протекания процессов трения и изнашивания. Основой обеспечения структурной приспособляемости является достижение динамического равновесия и саморегулирования процессов, протекающих при трении.

Существенное влияние на закономерности и интенсивность изнашивания оказывает температура. При положительной температуре окружающей среды, низких скоростях скольжения и высоких нагрузках изнашивание железоуглеродистых сплавов в основном происходит вследствие упругой и пластической деформации. При этом иногда наблюдается выдавливание металла из максимально нагруженной зоны на периферийные участки. Выдавленный металл часто подвергается повторным деформациям, что приводит к отделению частиц износа. Фактически этот процесс характеризуется как изнашивание в результате малоциклового усталости.

При действии климатически низких температур нередко происходит охрупчивание металлических материалов. В этом случае при воздействии ударных нагрузок изнашивание происходит путем скола по опасным сечениям и является следствием развития дефектов кристаллического строения материала деталей. Поверхностно-активные вещества, содержащиеся в древесине, вызывают адсорбционное пластифицирование (эффект Ребиндера), облегчающее развитие микротрещин и интенсифицирующее хрупкое разрушение при малых интенсивностях напряженного состояния, вплоть до самопроизвольного диспергирования.

Увеличение доли выкрашивания при механическом износе железоуглеродистых

сплавов связано с тем, что в условиях многоосного напряженного состояния, возможного действия низких температур и активных сред, высокого уровня динамических нагрузок происходит охрупчивание материала деталей и, соответственно, интенсификация выкрашивания.

В процессе эксплуатации микрообъемы изнашиваемого слоя испытывают деформации, приводящие к появлению упругих и пластических искажений решетки, увеличению плотности дислокаций. Многократное деформирование материала способствует концентрации микродефектов и, после достижения некоторой критической концентрации, образованию микротрещин. Дальнейшее нагружение вызывает развитие и слияние микротрещин.

Кроме того, под действием сил трения разрыхленный оксидный слой легко разрывается, обнажая ювенильные поверхности, что значительно облегчает проникновение ионов водорода в поверхностные слои и интенсифицирует процесс разрушения. Водород, проникая в поверхностный слой металла, создает в нем высокие давления, которые приводят к образованию напряженного состояния в решетке металла, возникновению и росту микротрещин и расслаиванию структуры.

На изнашивание железоуглеродистых сплавов при ударе существенное влияние оказывают наличие абразива в зоне фрикционного контакта, энергия удара, форма и площадь контакта, размер абразивных частиц, соотношение твердости материала и абразива и т.д. При высокой удельной энергии удара по абразиву в зоне контакта реализуется малоцикловое усталостное разрушение, в результате которого при недостаточной прочности металла одновременно с абразивным изнашиванием происходят микросрезы, выкрашивание металла и его сколы [9].

Таким образом, для достижения повышенной износостойкости железоуглеродистых сплавов, контактирующих с древесным веществом, необходимо обеспечить формирование в поверхностном слое благоприятных физико-механических характеристик: твердости, ударной вязкости, сопротивляемости росту микротрещин,

стойкости к действию абразива и коррозионно-активных сред. Также для уменьшения интенсивности изнашивания необходимо повышение контактной выносливости и абразивной стойкости поверхностей. Немаловажную роль играет наличие в зоне фрикционного взаимодействия концентраторов напряжений, способность к их развитию в процессе фрикционного взаимодействия. Снижение количества концентраторов напряжений и торможение развития микротрещин можно обеспечить путем создания вязких прослоек между отдельными зонами, также возможно сформировать благоприятный уровень сжимающих остаточных напряжений.

Кроме того, назначаемая упрочняющая обработка должна обеспечивать расщепление подводимой при трении энергии, для чего рекомендуется микрогетерогенная структура, обеспечивающая благоприятную совокупность физико-механических и химических свойств функциональных поверхностных слоев. Поскольку одним из факторов оптимизации характеристик поверхностных слоев является повышение их стойкости к действию коррозионно-активных веществ, то целесообразно при проведении упрочняющей обработки формировать в поверхностном слое деталей мелкодисперсную аустенитно-мартенситную структуру.

Как отмечено выше, факторы, определяющие закономерности протекания процессов изнашивания железоуглеродистых сплавов при фрикционном взаимодействии с древесиной, достаточно многообразны. В то же время от их взаимовлияния в значительной степени зависит интенсивность протекания процессов изнашивания. Такое взаимовлияние коррозионного и механического изнашивания в целом и их отдельных частных механизмов следует рассматривать как синергетический эффект, проявляющийся в процессе коррозионно-механического изнашивания [5; 6; 11].

Среди факторов, определяющие закономерность и величину коррозионно-механического изнашивания, наиболее чувствительны к синергетическим прояв-

лениям следующие триботехнические характеристики поверхностных слоев:

- 1) значения коэффициента интенсивности напряжений;
- 2) усталостная прочность;
- 3) остаточное напряженное состояние;
- 4) структурное состояние и неоднородность;
- 5) сопротивляемость к насыщению активными средами;
- 6) насыщенность микротрещинами.

В частности, коррозионные процессы, протекающие в зоне действия механических нагрузок, значительно ускоряют изнашивание железоуглеродистых сплавов. Особенно если возможен переход химических процессов в электрохимические. В сухую погоду металл корродирует по механизму сухой коррозии, при увеличении влажности воздуха он начнет корродировать по механизму влажной коррозии, а при выпадении осадков уже будет иметь место мокрая коррозия. В дождливую погоду процессы перехода коррозии от одного механизма к другому происходят в обратном направлении.

Такая же взаимосвязанная картина наблюдается в процессе коррозионно-механического изнашивания, когда в зависимости от внешних условий происходит переход от одного типа изнашивания к другому.

Так, в зоне действия растягивающих или изгибающих напряжений и остаточных деформаций развивается так называемая коррозия под напряжением, которая ведет к транскристаллитному коррозионному растрескиванию железоуглеродистых сплавов даже в обычных атмосферных условиях. При знакопеременных нагрузках, характерных при эксплуатации машин и оборудования лесного комплекса, проявляется коррозионная усталость, выражающаяся в резком понижении предела усталости металла в присутствии коррозионной среды [7].

Обычно в основе коррозии металлов лежат химические реакции между структурными составляющими материала и средой, протекающие на границах раздела фаз. Этот процесс является самопроиз-

вольным и происходит вследствие окислительно-восстановительных реакций с компонентами окружающей среды.

При этом утечка электрического тока через границу металла с агрессивной средой вызывает, в зависимости от своего характера и направления, дополнительные анодные и катодные реакции, которые могут прямо или косвенно вести к ускоренному местному или объемному разрушению (коррозия блуждающим током).

При одновременном воздействии напряженного состояния, чаще всего напряжений растяжения, и агрессивных сред происходит квазихрупкое разрушение стали, представляющее собой коррозионное растрескивание с характерным образованием единичных и множественных трещин, особенно в зонах концентрации рабочих и остаточных напряжений. Эти трещины могут распространяться между кристаллами или по телу зерен, но с гораздо большей скоростью в плоскости, нормальной к действующим напряжениям, чем в плоскости их действия [1].

Коррозионное растрескивание сталей может развиваться в атмосферных условиях и в смесях $\text{CO-CO}_2\text{-H}_2\text{-H}_2\text{O}$, а также в присутствии аммиака или сероводорода. Коррозия, связанная со структурной неоднородностью металла (структурная коррозия), вызывает ускорение коррозионного процесса в растворах кислотных жидкостей с катодными включениями - карбидами и свободным графитом.

К ускоренному износу металла приводит одновременное влияние коррозионных факторов и разрушающего абразивного воздействия [10]. В этом случае особо интенсивное механическое удаление образующихся продуктов коррозии при трении приводит к постоянной регенерации химического потенциала поверхности и замедлению процесса пассивации. На изменение потенциала влияет пластическая деформация, характерная для абразивного износа и связанная с движением и выходом на поверхность дислокаций. Таким образом, поверхность трения работает в условиях интенсивного импульсного колебания химического потенциала.

При этом коррозионные взаимодействия наиболее вероятны в зонах разнообразных дефектов металла, что приводит к неравномерному разрушению и разрыхлению поверхностного слоя в отдельных микрообъемах и, соответственно, уменьшению показателей механической прочности. Поэтому увеличение скорости образования и удаления частиц износа и снижение прочностных свойств поверхности обуславливают ускорение проявления механической составляющей процесса изнашивания.

Таким образом, эксплуатационные условия работы деталей и инструментов, взаимодействующих с древесинными веществами, таковы, что в зоне фрикционного контакта древесины и железоуглеродистых сплавов чрезвычайно сложно исключить взаимовлияние коррозионных и механических воздействий при их изнашивании.

На основании изложенного можно утверждать о важнейшей роли синергетических явлений в формировании износа, наблюдаемого в процессе эксплуатации железоуглеродистых сплавов, контактирующих с древесиной. В этой связи для решения проблемы повышения износостойкости, коррозионной стойкости, усталостной и контактной выносливости функциональных поверхностных слоев железоуглеродистых сплавов целесообразно применение комплексной упрочняющей обработки, обеспечивающее оптимизацию многих из упомянутых выше триботехнических параметров функциональных слоев.

Одним из перспективных методов упрочняющей обработки функциональных поверхностных слоев является комплексная обработка, сочетающая поверхностное легирование и механическую деформацию. При этом целесообразно применение в качестве деформирующих инструментов металлических щеток с управляемой жесткостью.

Достоинствами указанного метода являются простота, высокая стойкость и гибкость рабочей части инструмента, что позволяет обрабатывать маложесткие детали, детали с прерывистыми и сложными поверхностями. Для такого рода упроч-

няющей обработки возможно применение дисковых щеток различной конструкции, в том числе позволяющих совмещать электроискровое легирование и последующую деформационно-миксирующую обработку.

К основным технологическим факторам процесса обработки дисковыми щетками относятся: длина ворса, скорость вращения щетки, технологический натяг и время обработки. Первые три из упомянутых факторов определяет жесткость проволочного ворса, от которой зависят силовые и температурные характеристики контакта щетки с поверхностью.

При этом на всей длине обрабатываемой поверхности помимо указанных выше параметров упрочняемых поверхностей формируются благоприятные сжимающие остаточные напряжения, величина которых зависит от упругости щеток, угла атаки и плотности ворса.

С повышением плотности ворса эффект ударного воздействия снижается, так как действие последующих проволок смягчается предыдущими, вступившими в контакт. При этом максимум действующих упрочняющих напряжений отмечается на входе проволок в контакт.

Наибольшее сглаживание микрорельефа обрабатываемой поверхности наблюдается при обработке щеткой с диаметром проволок 0,2...0,5 мм, окружной скоростью инструмента 12...20 м/с и вылетом проволочного ворса на 30...50 мм. Остаточные сжимающие напряжения, формируемые в поверхностном слое, достигают от 400 до 1200 МПа в зависимости от твердости детали, а глубина упрочнения составляет 20...100 мкм.

Эффективным методом упрочнения поверхностных слоев железоуглеродистых сплавов также является деформационное упрочнение металлическими щетками, в основу которого положено механотермическое взаимодействие металлической щетки с поверхностью изделия. При такой обработке формируется тонкий, сильно деформированный биметаллический слой, состоящий из материала, привнесенного гибкими элементами щетки, и материала упрочняемой основы [1-3].

Упрочняющая обработка как способ повышения износостойкости железоуглеродистых материалов в рассматриваемых условиях должна носить комплексный характер.

Большими перспективами повышения износостойкости рассматриваемых изделий обладают деформационные методы обработки в сочетании с воздействием концентрированными потоками энергии, например использование электроискрового упрочнения. Дополнительным достоинством этого метода является возможность локальной концентрации энергии в требуемой зоне, труднодоступной для других методов.

В результате электроискрового воздействия образуется упрочненный слой, под которым расположен материал с понижающейся по глубине твердостью, обладающий повышенной пластичностью. В процессе электроискровой обработки происходит перенос материала электрода, растворение его в основном материале и прочное сцепление поверхностного слоя с нижележащим за счет их интенсивного смешивания в расплавленном состоянии. Наблюдаются также растворение и взаимная диффузия элементов, изменение структуры с образованием карбидов и карбонитридов, уплотнение материала поверхностного слоя, препятствующее перемещению дислокаций на поверхность [4]. В результате электроискровой обработки изменяются физико-механические свойства обрабатываемого материала с образованием структур высокой гетерогенности.

К недостаткам данного метода можно отнести значительные высотные параметры шероховатости формируемых поверхностей, образование остаточных напряжений растяжения и нестабильность получаемых свойств [4; 8]. Устранить эти недостатки и значительно улучшить характеристики поверхностей, формируемые в процессе электроискрового упрочнения, позволяет дополнительная деформационная обработка. Она обеспечивает снижение параметров микрогеометрии и формирование благоприятных напряжений сжатия. При этом эффективность повышается в случае выполнения деформирующей обра-

ботки непосредственно после электроискрового разряда, пока рассматриваемый участок поверхности находится в разогретом состоянии.

В связи с этим были предложены процессы обработки, сочетающие электроискровое воздействие и последующее за ним деформационное упрочнение обрабатываемой поверхности и представляющие своего рода термомеханическую обработку, сочетающуюся с поверхностным легированием. Такая обработка позволяет обеспечить высокую износостойкость поверхностных слоев деталей рассматриваемой техники.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Изнашивание железоуглеродистых сплавов, находящихся в контакте с древесиной, характеризуется взаимовлиянием множества факторов, проявляющимся в усилении интенсивности разрушения поверхностей трения при комбинированном

действии коррозионных и механических процессов, результаты которого следует рассматривать как синергетический эффект коррозионно-механического изнашивания.

2. Повышение износостойкости, коррозионной стойкости, усталостной и контактной выносливости железоуглеродистых материалов можно обеспечить применением комплексных конструкторско-технологических методов, позволяющих формировать благоприятную совокупность физико-механических свойств функциональных поверхностных слоев.

3. Перспективными методами упрочняющей обработки, обеспечивающими оптимизацию многих упомянутых выше триботехнических параметров функциональных слоев, являются комбинированные методы, сочетающие одновременное или последовательное воздействие концентрированными потоками энергии и деформационное упрочнение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анцупов, В.П. Теория и практика плакирования изделий гибким инструментом / В.П. Анцупов [и др.]. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 1999. - 241 с.
2. Гаркунов, Д.Н. Триботехника. Износ и безызносность / Д.Н. Гаркунов [и др.]. - М.: Изд-во МСХА, 2001. - 616 с.
3. Козлов, В.Г. Методы борьбы с коррозией металлов / В.Г. Козлов, И.В. Титова, А.Н. Коноплин, Н.Н. Бугыгин // *Фундаментальные исследования*. – 2017. – № 6. – С. 53-57.
4. Buglaev, A.M. Improving wear resistance of surface of hard alloy parts by diamond polishing / A.M. Buglaev, E.A. Pamfilov // *Friction and wear*. - 2001. - Т. 22.- № 4. - Р. 429-434.
5. Прозоров, Я.С. Разработка композиционных покрытий для узлов трения оборудования для производства стружки / Я.С. Прозоров // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сб. науч. тр.* – Воронеж: ВГЛТА, 2014. - № 3. - Ч. 2 (8-2). – С. 407-411.
6. Pamfilov, E.A. On the modeling of mechanochemical wear / E.A. Pamfilov, Y.S. Prozorov // *Journal of Friction and Wear*. - 2012. - Т. 33. - № 3. - P. 224-232.
7. Pilyushina, G.A. Improving the performance of machining tools for nonmetallic materials / G.A. Pilyushina, P.G. Pyrikov, A.S. Rukhlyadko // *Russian Engineering Research*. - 2013. - Т. 33. - № 9. - P. 532-535.
8. Памфилов, Е.А. Возможности и перспективы повышения работоспособности машин и оборудования лесного комплекса / Е.А. Памфилов, Г.А. Пилюшина // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. - 2013. - № 5 (335). - С. 10-13.
9. Сорокин, Г.М. Трибология сталей и сплавов: учеб. пособие / Г.М. Сорокин [и др.]. - М.: Недра, 2000. - 317 с.
10. Сорокин, Г.М. Коррозионно-механическое изнашивание сталей и сплавов: учеб. пособие / Г.М. Сорокин, А.П. Ефремов, Л.С. Саакян [и др.]. - М.: Нефть и газ, 2002. – 424 с.
11. Tribocorrosion of passive metals and coatings / edited by Dieter Landolt and Stefano Mischler. - UK, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2011. – 579 p.
1. Antsupov, V.P. *Theory and Practice of Cladding Products by Elastic Tool* / V.P. Antsupov [et al.]. - Magnitogorsk: Nosov STU of Magnitogorsk, 1999. – pp. 241.
2. Garkunov, D.N. *Tribology. Wear and Non-Wear* / D.N. Garkunov [et al.]. – М.: Publishing House of MAA, 2001. – pp. 616.
3. Kozlov, V.G. Method for metal corrosion control / V.G. Kozlov, I.V. Titova, A.N. Konoplin, N.N. Bu-

- tygin // *Fundamental Investigations*. – 2017. – No.6. – pp. 53-57.
4. Buglaev, A.M. Improving wear resistance of surface of hard alloy parts by diamond polishing / A.M. Buglaev, E.A. Pamfilov // *Friction and wear*. - 2001. - Т. 22.- № 4. - P. 429-434.
 5. Prozorov, Ya.S. Composite coating development for friction units of equipment for chips manufacturing / Ya.S. Prozorov // *Urgent Directions of Scientific Investigations in the XXI-st Century: Theory and Practice: Proceedings*. – Voronezh: VSFTA, 2014. – No.3. – Part 2(8-2). – pp. 407-411.
 6. Pamfilov, E.A. On the modeling of mechanochemical wear / E.A. Pamfilov, Y.S. Prozorov // *Journal of Friction and Wear*. - 2012. - Т. 33. - № 3. - P. 224-232.
 7. Pilyushina, G.A. Improving the performance of machining tools for nonmetallic materials / G.A. Pilyushina, P.G. Pyrikov, A.S. Rukhlyadko // *Russian Engineering Research*. - 2013. - Т. 33. - № 9. - P. 532-535.
 8. Pamfilov, E.A. Potentialities and outlooks of forest machinery and equipment working capacity increase / E.A. Pamfilov, G.A. Pilyushina // *College Transactions. Forest Journal*. – 2013. – No. 5(335). – pp. 10-13.
 9. Sorokin, G.M. *Steel and Alloy Tribology: Manual* / G.M. Sorokin [et al.]. М.: Mineral Resources, 2000. – pp. 317.
 10. Sorokin, G.M. Steel and alloy corrosion-mechanical wear: manual / G.M. Sorokin, A.P. Yefremov, L.S. Saakyan [et al.]. – М.: *Oil and Gas*, 2002. – pp. 424.
 11. Tribocorrosion of passive metals and coatings / edited by Dieter Landolt and Stefano Mischler. - UK, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2011. – 579 p.

Статья поступила в редакцию 16.07.18.

*Рецензент: д.т.н., профессор Брянского инженерно-технологического университета
Заикин А.Н.*

Статья принята к публикации 10.10.18.

Сведения об авторах:

Памфилов Евгений Анатольевич, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Триботехническое материаловедение и технологии материалов» Брянского государственного технического университета, ст. науч. сотрудник Научно-исследовательской лаборатории инженерии материалов и адаптивных технологических систем, e-mail: epamfilov@yandex.ru.

Pamfilov Evgeny Anatolievich, Dr. Sc. Tech., Prof., Head of the Dep. “Tribotechnical Material Science and Technologies of Materials”, Bryansk State Technical University, Senior researcher of Scientific Research Lab. of Material Engineering and Adaptive Technological Systems, e-mail: epamfilov@yandex.ru.

Пилушина Галина Анатольевна, к.т.н., доцент Брянского государственного технического университета, e-mail: gal-pi2009@yandex.ru.

Капустин Владимир Васильевич, аспирант Брянского государственного технического университета, науч. сотрудник Научно-исследовательской лаборатории инженерии материалов и адаптивных технологических систем, e-mail: vovakapustin1990@mail.ru.

Pilyushina Galina Anatolievna, Can. Sc. Tech., Assistant Prof., Bryansk State Technical University, e-mail: gal-pi2009@yandex.ru.

Kapustin Vladimir Vasilievich, Post graduate student, Bryansk State Technical University, Research assistant of Scientific Research Lab. of Material Engineering and Adaptive Technological Systems, e-mail: vovakapustin1990@mail.ru.