

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2020, №1, Том 12 / 2020, No 1, Vol 12 <https://esj.today/issue-1-2020.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/77SAVN120.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Жаров В.Г., Максимов А.В., Сумзина Л.В. Анализ причин разрушения контактирующих поверхностей деталей подшипниковых опор машин и технологического оборудования зданий и сооружений // Вестник Евразийской науки, 2020 №1, <https://esj.today/PDF/77SAVN120.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Zharov V.G., Maximov A.V., Sumzina L.V. (2020). Analysis of the causes of destruction of the contacting surfaces of parts of bearing bearings of machines and technological equipment of buildings and structures. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 1(12). Available at: <https://esj.today/PDF/77SAVN120.pdf> (in Russian)

УДК 665.765

ГРНТИ 30.9

Жаров Василий Геннадьевич

ФГБОУ ВО «Российский государственный университет туризма и сервиса», дп. Черкизово, Россия
Доцент высшей школы сервиса
Кандидат технических наук
E-mail: basille@mail.ru
РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=320941

Максимов Александр Васильевич

ФГБОУ ВО «Российский государственный университет туризма и сервиса», дп. Черкизово, Россия
Доцент высшей школы сервиса
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: maksimovav52@yandex.ru
РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=227609

Сумзина Лариса Владимировна

ФГБОУ ВО «Российский государственный университет туризма и сервиса», дп. Черкизово, Россия
Директор высшей школы сервиса
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: byttech1@yandex.ru
РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=633241

Анализ причин разрушения контактирующих поверхностей деталей подшипниковых опор машин и технологического оборудования зданий и сооружений

Аннотация. Рассмотрены процессы разрушения контактирующих поверхностей подшипников качения машин и технологического оборудования бытового назначения и коммунального хозяйства, а также других деталей, поверхности которых, работают в условиях многоциклового поверхностного пластического деформирования.

Проанализированы причины разрушения контактирующих поверхностей подшипников качения машин и технологического оборудования предприятий сервиса, а также других деталей, поверхности которых, работают в условиях многоциклового поверхностного пластического деформирования.

Отмечено, что контактная зона пар трения и в особенности трещины и выходящие наружу межзёренные граничные прослойки являются проводниками, через которые атомы других элементов проникают в твердое тело. Динамический контакт сталей с углеводородной

средой сопровождается ее термомеханической деструкцией. В результате вторичных превращений продуктов деструкции, а также частичной диссоциации воды на фрикционном контакте происходит выделение свободного водорода и его поглощение приповерхностными объемами металла. Следствием этих процессов является увеличение концентрации водорода в приповерхностных слоях деталей машин и механизмов (подшипников качения и скольжения) в том числе машин и технологического оборудования предприятий бытового обслуживания, коммунального хозяйства и сервиса.

Показано, что наибольшее влияние на срок службы контактирующих поверхностей подшипников качения машин и технологического оборудования предприятий бытового обслуживания, коммунального хозяйства и сервиса, а также других деталей, поверхности которых, работают в условиях многоциклового поверхностного пластического деформирования оказывает наличие свободного «диффузионно-активного» водорода, который приводит к дальнейшему образованию дефектов, водородному разрушению стали в поверхностном слое детали.

Ключевые слова: срок службы; усталостные трещины; поверхностное пластическое деформирование; деформационное упрочнение; контактная усталость; водород; водородное изнашивание; наводороживание; пара трения; узел трения

Исследованию процессов разрушения контактирующих поверхностей подшипников качения машин и технологического оборудования бытового назначения и коммунального хозяйства, а также других деталей, поверхности которых работают в условиях многоциклового поверхностного пластического деформирования, посвящено большое количество работ и исследований [1; 5–9; 11; 12; 14].

По мнению исследователей, [4; 7; 11; 12] одной из основных причин выхода из строя вращающегося подшипника, выбранного в полном соответствии с заданными условиями его эксплуатации, т. е. при обеспечении оптимальных условий для его установки, смазки, охлаждения, защиты от внешней среды и т. д., является усталостное разрушение материала, возникающее на поверхностях качения в результате воздействия того или иного числа повторяющихся и(или) знакопеременных напряжений сжатия и сдвига. Начальный период усталостного разрушения элементов подшипника качения определяется по отслаиванию частиц металла с поверхностей качения, которое происходит в результате возникновения трещины под контактной поверхностью. Трещина, увеличиваясь в размерах, выступает на поверхность, образуя углубление и процесс разрушения интенсифицируется.

Значительное число ученых, занимающихся исследованием работоспособности подшипников качения, разрушение рабочих поверхностей также связывают с усталостными явлениями [4; 7; 12].

В работах [4; 7; 12] отмечено, что причиной возникновения усталостной трещины в металле являются ортогональные напряжения сдвига, действующие на некоторой глубине от поверхности качения. Обычно усталостные трещины образуются на участках, ослабленных микроскопическими шлаковыми включениями, поэтому химический состав, металлургическая структура и однородность стали, при прочих равных условиях, существенно влияют на усталостные характеристики подшипников.

Таким образом, можно говорить о влиянии технологической наследственности на основные эксплуатационные характеристики деталей пар трения, в том числе на контактную усталость и разрушение рабочих поверхностей. В данном случае под технологической наследственностью понимается перенесение на готовое изделие в процессе его обработки погрешностей, механических и физико-химических свойств исходной заготовки, а также

свойств и погрешностей, сформировавшихся у заготовки на отдельных операциях технологической обработки [1; 4; 12]. Для понимания явлений, происходящих при технологической обработке и эксплуатации изделия, в частности, подшипника качения, рассмотрим строение поверхностного слоя детали.

Он включает в себя [1; 4; 12] наружную поверхность, имеющую непосредственный контакт с внешней средой (граничный слой), и нижележащий слой деформированного металла, отличающегося от основной части (сердцевины) металла своим строением, механическими, физическими и химическими свойствами.

Вследствие своей повышенной активности поверхность пары трения твердого тела неизбежно адсорбирует элементы окружающей среды и, как правило, бывает покрыта слоями адсорбированных газов, паров воды и жиров, часто осаждающихся прямо из воздуха. Толщина адсорбированных водяных паров составляет порядка 50–100 молекулярных слоев. Поверхности твердых тел в значительной степени адсорбируют также и газы. Особенно прочные связи дает химическая адсорбция, при которой толщина слоя газов составляет порядка 10^{-6} – 10^{-7} мм.

Адсорбированные слои смазки, особенно поверхностно-активной, оказывают значительное влияние на величину поверхностной энергии, на процесс пластической деформации, на диспергирование поверхностных слоев и прочность металла (эффект Ребиндера). Адсорбция снижает поверхностное натяжение и энергию атомов поверхностного слоя и облегчает развитие деформации.

Контактная зона пар трения и в особенности трещины и выходящие наружу межзёренные граничные прослойки являются проводниками, через которые атомы других элементов проникают в твердое тело.

Ниже граничного слоя, покрытого пленкой жиров, водяных паров, адсорбированных пленок и окислов, обычно располагается слой сильно деформированного и упрочненного металла. У металлов, находящихся в ненапряженном и отожженном состоянии, ниже слоя окисных пленок располагается основная поликристаллическая структура, состоящая из более или менее равновесных кристаллических зерен неправильной формы (обычно с размерами от 0,01 до 1,0 мм), связанных межзёренной прослойкой. Кристаллические зерна (кристаллиты) построены из рядов атомов, расположенных определенным образом, образующих соответствующие данному металлу кристаллические решетки, однако в этом случае никакой закономерности взаимной ориентировки направлений кристаллографических осей отдельных зерен не существует.

Межзёренная прослойка имеет искаженную кристаллическую решетку с дислоцированными атомами основного материала и примесей, интенсивно накапливающимися у границ зерен. Прослойка имеет разрыхленное строение с ослабленными силами сцепления и повышенной энергией атомов. При упрочнении у границ зерен как раз и возможно зарождение трещин.

Возникновение вакансий изменяет плотность поверхностного слоя металла пар трения, а наличие вакансий и дислоцированных атомов приводит, в свою очередь, к значительным искажениям кристаллической решетки.

В связи с тем, что пластическая деформация представляет собой движение дислокации по плоскостям скольжения с их выходом на поверхность кристалла, возникновение всевозможных препятствий, затрудняющих движение дислокации, вызывает упрочнение поликристалла.

К числу подобных препятствий прежде всего относятся другие дислокации, имеющиеся в кристалле, так как преодоление сил отталкивания одноименных дислокаций и точек пересечения различных дислокаций требует затрат дополнительной энергии. В связи с этим увеличение общего числа дислокаций (т. е. повышение плотности дислокации), происходящее в связи с их генерированием источниками Франка-Рида в процессе пластической деформации, сопровождается деформационным упрочнением и зарождением новых дефектов кристаллической решетки металла пар трения.

Деформационное упрочнение поверхностного слоя (наклеп) металла, обрабатываемого резанием и другими механическими способами обработки металлов, в значительной степени основано на увеличении плотности дислокации, что, в конечном счете, приводит к движению потоков дислокаций при динамическом контакте деталей.

Динамический контакт сталей, в том числе шарикоподшипниковых, с углеводородной средой (смазочный материал, влага и т. д.) сопровождается ее термомеханической деструкцией. В результате вторичных превращений продуктов деструкции, а также частичной диссоциации воды на фрикционном контакте происходит выделение свободного водорода и его поглощение приповерхностными объемами металла. Следствием этого является увеличение концентрации водорода в приповерхностных слоях деталей машин и механизмов (подшипников качения и скольжения) в том числе машин и технологического оборудования предприятий сервиса. Наличие водорода в металле контактирующих пар трения оказывает большое влияние на срок службы узлов и агрегатов.

Водород захватывается потоками дислокаций и передвигается вместе с ними в глубь металла; проникновение водорода также может происходить по межзёренным граничным прослойкам. Диффузионно-активный водород скапливается на различных структурных нарушениях металла – микротрещинах, примесных атомах и т. д. Критическое количество водорода, накопленного в поверхностных слоях металла и вызывающее их разрушение, определяется не только диффузионно-активным водородом, образованным и захваченным металлом при эксплуатации, но и водородом, содержащимся в материале деталей до эксплуатации и захваченным при их изготовлении, то есть имеющим природу, объясняемую технологической наследственностью [4; 7; 8; 11–13].

Для объяснения влияния водорода на срок службы пар трения предложено большое количество теорий [2; 3; 6; 7; 9; 10; 14]. Обобщая современные представления, можно сделать следующие выводы: образование микротрещин происходит в результате скопления дислокаций на границах зерен, а адсорбция водорода на внутренних поверхностях этих трещин понижает поверхностную энергию и, соответственно, напряжения, необходимые для их распространения; водород может адсорбироваться не только на внешних и внутренних поверхностях, но также может находиться и на других структурных несовершенствах: в междоузлиях кристаллической решетки и ее микронарушениях, в макродефектах, например, неметаллических включениях. Водород также может группироваться в виде атмосфер Коттрелла вокруг дислокаций и перемещаться с ними в процессе деформации. В силу своей природы водород стремится переместиться в зону максимальных температур, которая располагается на некотором расстоянии от контактной поверхности в приповерхностном слое металла [7; 12].

Проникновение водорода в стали может происходить практически при любых видах технологической обработки: механической, термической, химико-термической. Так, например, в работе [4] отмечается, что для стальных деталей с метастабильными структурами проявляются тенденции к повышению водородопроницаемости по сравнению с равновесными структурами. Это подтверждается также в работах И.Э. Пашковского и М.Е. Ставровского [7; 14], изучавших технологическое наводороживание углеродистых и легированных сталей. В работах [8; 12] показано, что содержание водорода в стальном образце после закалки

увеличилось в 3,1 раза. Аналогичные результаты получены также рядом авторов [9; 10]. Большая часть водорода, захваченного сталями на этапе закалки, взаимодействуя с аустенитом при охлаждении от закалочных температур, образует твердые растворы и химические соединения, повышая общее содержание водорода.

Существенными факторами, определяющими наводороживание сталей, является их структура и химический состав. Эти факторы влияют как на диффузию водорода в сталях и растворимость его в кристаллической решетке, так и на поглощение водорода различного вида ловушками в металле.

Заслуживают большого внимания исследования ряда ученых, результаты которых обобщены в работе [4], согласно физической модели, процесс трения порождает движение скоплений дислокаций. В это же время происходит хемосорбция водорода и решеточная диффузия в поле напряжений, а часть свободного водорода перемещается скоплениями дислокаций; некоторое количество атомов (ионов) диффундирующих в поле напряжений встречаются с дислокациями и взаимодействуют с ними. Движение дислокаций и скоплений дислокаций вместе с атомами (ионами) водорода способствует образованию и развитию дефектов – трещин, внутри которых скапливается свободный водород, происходит понижение поверхностной энергии внутри дефектов, молизация водорода внутри дефектов и повышение его давления, дальнейшее развитие дефектов и разрушение поверхностного слоя детали.

Для лучшего представления процессов водородного охрупчивания и изнашивания, рассмотрим данные явления с точки зрения физико-химических процессов [2; 7–9; 12; 14].

Водород в зоне фрикционного контакта может существовать в трех формах: в виде ионизированного атома-протона H^+ , атомарного H и молекулярного H_2 водорода. Водород присутствует в различных соединениях, но выделяться из них он может в виде H^+ . Прежде всего это относится к молекулам поверхностно-активных веществ смазок и к воде, которые имеют OH^- и $COOH^-$ группы. Возникающие протоны водорода имеют чрезвычайно малые размеры (10^{-15} м) и проявляют высокую поляризирующую активность. Переход H^+ в более устойчивое электронейтральное состояние может происходить при рекомбинации противоположно заряженных ионов или при нейтрализации H^+ свободными электронами e^- электронного облака металлической поверхности. Такое превращение идет в граничном слое с выделением энергии $E = 13,6$ эВ ($2,18 \times 10^{-18}$ Дж) по типу $H^+ + e^- \rightarrow H + E$. Атом водорода H имеет размер $(0,31 - 0,78) \times 10^{-10}$ м, на пять порядков превосходящий радиус H^+ . Вместе с тем его электронейтральность уменьшает дальное действие до расстояний, соответствующих фактическим размерам, когда вступают в действие химические связи; взаимодействие атомарного водорода с поверхностью может сопровождаться следующими процессами [4]: (а) проникновением атомарного водорода в материал, гидридизацией и охрупчиванием последнего; (б) взаимодействием водорода с составляющими сплавов и примесями; (в) образованием молекулярного водорода H_2 при соударении атомов H и образованием ковалентной связи $H + H \rightarrow H_2 + 7,2 \times 10^{-19}$ Дж (выделяющаяся при этом энергия влияет на сопутствующие процессы). Образующийся в последнем случае молекулярный водород не является последней стадией превращений, окисляясь, он создает воду: $H_2 + 0,5 O_2 \rightarrow H_2O + 4,9 \times 10^{-19}$ Дж. Во всех трех актах превращение водорода сопровождается выделением тепла, которое стимулирует химические и физические превращения на поверхности и в верхних слоях детали, в частности усиливается растворение водорода в железе, что способствует охрупчиванию и разрушению стали. С другой стороны, при тепловом воздействии молекулярный водород может переходить к атомарному состоянию. Все последующие при цепном превращении формы водорода имеют больший объем, чем исходные, вследствие чего в микродефектах структуры действует механическое разжимающее усилие,

способствующее разрушению. Кроме того, тепловое воздействие оказывает дополнительное влияние на образование и распространение трещин [10].

Вышесказанное позволяет сделать вывод о том, что водород в металле может существовать в виде твердых растворов, химических соединений и свободном состоянии. Наибольшее влияние на водородное разрушение стали, по нашему мнению, оказывает свободный – «диффузионно-активный» водород. Направление перемещения свободного водорода может определяться градиентами концентраций и температур, напряженным состоянием кристаллической решетки, изменением структурного состояния стали. Водород стремится в зону повышенных температур, которая находится на некотором расстоянии от поверхности трения. С прекращением контактного взаимодействия температурный максимум исчезает, и водород распределяется по объему в соответствии с полями напряжений и структурой материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ конструкций подшипниковых опор технологического оборудования сервисных предприятий. Жаров В.Г., Сумзина Л.В., Максимов А.В. Промышленный сервис. 2018. № 2 (67). С. 37–39.
2. Арчаков Ю.И. Современные проблемы защиты металлов от водородной коррозии // Физико-химическая механика материалов, 1986, № 3, с. 15–20.
3. Влияние состава пластичного смазочного материала на эксплуатационные характеристики подшипниковых опор машин и оборудования коммунального хозяйства и сервисных предприятий. Жаров В.Г., Сумзина Л.В., Максимов А.В. Промышленный сервис. 2018. № 3 (68). С. 22–26.
4. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность): Учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МСХА, 2001. 616 с.
5. Жаров В.Г., Пашковский И.Э., Орлов Р.Н. Исследование влияния нагрузки, угловой скорости и степени проскальзывания на контактную выносливость стальных образцов. В кн. Новые материалы и производственные технологии. Материалы VII международной научно-практической конференции «Наука – индустрии сервиса». М.: МГУ сервиса, 2002, с. 35–36.
6. Оптимизация состава металлоплакирующей смазки для подшипниковых опор. Пашковский И.Э., Жаров В.Г., Шестопалов Т.А. Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2004. № 2. С. 30.
7. Пашковский И.Э. Повышение срока службы деталей подшипниковых опор стирально-отжимных машин технологическими методами. Автореф. дис. канд. техн. наук. М., 1990, 19 с.
8. Пашковский И.Э., Бестаев И.Н. Механизм наводороживания поверхностных слоев стальных деталей. В кн.: Прогрессивные технологии и научные исследования в сфере сервиса: межвузовский сборник научных трудов. М.: МГУС, 1999, с. 71–72.
9. Пашковский И.Э., Бестаев И.Н., Жаров В.Г. Разработка физической модели водородного изнашивания уплотнительных сопряжений стирально-отжимных машин и рекомендации по защите от него. В кн.: Новые материалы и

- производственные технологии в сфере сервиса. Межвузовский сборник научных трудов. М.: МГУС, 2000, с. 11–14.
10. Пашковский И.Э., Нашивочников В.В. Исследование наводороживания углеродистых сталей в процессе технологической обработки и эксплуатации. В кн.: Исследования в области сервиса: академический сборник научных трудов. М.: ГАСБУ, 1999, с. 62–64.
 11. Повышение срока службы подшипниковых опор стирально-отжимных машин бытового назначения и коммунального хозяйства. Жаров В.Г. диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Москва, 2003.
 12. Прокопенко А.К. Повышение срока службы трущихся деталей и инструмента машин легкой промышленности и бытового назначения в процессе эксплуатации. Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. М., 2000. 51 с.
 13. Рекомендации по использованию технологии обработки узлов и деталей машин в металлоплакирующих средах. Пашковский И.Э., Прокопенко А.К., Францев В.Н., Пашковская Т.И., Светлаков В.М., Корнеев А.А., Жаров В.Г., Горлов Е.С., Соколова Е.И. МГУС, Москва, 2003.
 14. Ставровский М.Е., Полянин Б.А. Методы защиты деталей гидроаппаратуры от водородного изнашивания / Повышение срока службы машин и оборудования бытового обслуживания на основе триботехники. М.: МТИ, 1989, с. 62–70.

Zharov Vasily Gennadyevich

Russian state university of tourism and service, sv. Cherkizovo, Russia
E-mail: basille@mail.ru

Maximov Alexander Vasilyevich

Russian state university of tourism and service, sv. Cherkizovo, Russia
E-mail: maksimovav52@yandex.ru

Sumzina Larisa Vladimirovna

Russian state university of tourism and service, sv. Cherkizovo, Russia
E-mail: byttech1@yandex.ru

**Analysis of the causes of destruction
of the contacting surfaces of parts of bearing bearings
of machines and technological equipment
of buildings and structures**

Abstract. The processes of destruction of the contact surfaces of rolling bearings of machines and technological equipment for domestic use and utilities, as well as other parts whose surfaces work under conditions of multi-cycle surface plastic deformation, are considered.

The causes of the destruction of the contacting surfaces of rolling bearings of machines and technological equipment of service enterprises, as well as other parts whose surfaces work under conditions of multi-cycle surface plastic deformation, are analyzed.

It is noted that the contact zone of friction pairs, and in particular cracks and intergranular interlayer layers emerging outside, are conductors through which atoms of other elements penetrate into the solid. Dynamic contact of steels with a hydrocarbon medium is accompanied by its thermomechanical destruction. As a result of secondary transformations of the degradation products, as well as partial dissociation of water at the frictional contact, free hydrogen is released and absorbed by the near-surface volumes of the metal. The consequence of these processes is an increase in the concentration of hydrogen in the near-surface layers of machine parts and mechanisms (rolling and sliding bearings), including machines and technological equipment of consumer services, utilities and services.

It is shown that the greatest influence on the service life of the contact surfaces of rolling bearings of machines and technological equipment of household services, utilities and services, as well as other details, the surfaces of which work under conditions of multi-cycle surface plastic deformation, is exerted by the presence of free “diffusion-active” hydrogen, which leads to further formation of defects, hydrogen destruction of steel in the surface layer of the part.

Keywords: service life; fatigue cracks; surface plastic deformation; strain hardening; contact fatigue; hydrogen; hydrogen wear; hydrogenation; friction pair; friction unit