

НАВОДОРОЖИВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ СТРУКТУРЫ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ В ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ

Доктора техн. наук, профессора СПИРИДОНОВ Н. В.¹⁾, ИВАШКО В. С.¹⁾,
канд. техн. наук КУДИНА А. В.²⁾, канд. техн. наук, доц. КУРАШ В. В.²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет,

²⁾Белорусский государственный аграрный технический университет

E-mail: sokorov@yandex.ru

HYDROGEN ABSORPTION AND STRUCTURE DESTRUCTION OF MACHINERY AND MECHANISM STEEL PARTS IN HYDROGEN-CONTAINING MEDIUM

SPIRIDONOV N. V.¹⁾, IVASHKO V. S.¹⁾, KUDINA A. V.²⁾, KURASH V. V.²⁾

¹⁾The Belarus National Technical University,

²⁾Belarusian State Agrarian Technical University

Водород является одним из самых распространенных химических элементов в природе. Молекулярный водород вступает в реакции с немногими химическими элементами, но, превращаясь в радикал, взаимодействует со многими. Насыщение металла водородом приводит к наводороживанию и разрушению. Приводятся хронология и сущность процессов механизма наводороживания, водородного изнашивания и разрушения металла, которые получены на основе анализа результатов научных исследований и экспериментов.

Ключевые слова: наводороживание, разрушение, стальные детали машин.

Ил. 2. Библиогр.: 10 назв.

Hydrogen is one of the most widespread chemical elements in the nature. Molecular hydrogen reacts with a few chemical elements but when hydrogen becomes a radical it interacts with a lot of elements. Metal saturation with hydrogen leads to hydrogen absorption and destruction. The paper presents chronology and essence of processes pertaining to mechanism of hydrogen absorption, hydrogen wear and metal destruction that have been obtained on the basis of the scientific investigation and experimental data analysis.

Keywords: hydrogen absorption, destruction, machinery steel parts.

Fig. 2. Ref.: 10 titles.

Водород – самый распространенный элемент как в космосе, так и на Земле. Он составляет (в ионизированном состоянии) более 70 % массы Солнца и звезд, является основной частью газов межзвездной среды и туманностей, а на Земле водород входит в состав воды, живых организмов, каменного угля, нефти и пр. Он является одним из основных химических элементов в составе живых микроорганизмов, и как биогенный элемент занимает важное место в метаболизме бактерий. В одних случаях водород – продукт их жизнедеятельности, а в других – он окисляется, давая энергию и обеспечивая в окружающем пространстве протекание и развитие биологических и биосинтетических процессов. Среди микроорганизмов, участвующих в метаболизме этого элемента,

много хемотрофов и фототрофов, способных выделять водород. Большое значение для его образования различными микроорганизмами имеет обеспечение их железом. При дефиците этого элемента выделение водорода резко снижается или вообще не происходит. В зависимости от особенностей микроорганизмов и окружающей их среды клетки по-разному выделяют водород во внешнее пространство [1, 2].

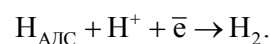
Водород растворяется в окта- и тетрапорах кристаллической решетки металлов в ионизированном состоянии, накапливается в кавернах, трещинах и других дефектах металла в молекулярной форме, вступает в химическое взаимодействие с различными элементами и фазами, имеющимися в металлах и сплавах. Результаты исследований системы «металл – водород» по-

казали, что водород растворяется практически во всех металлах (за исключением золота и ртути), вызывая изменения их физических, механических и эксплуатационных характеристик. Он адсорбируется внутри дефектов металла на поверхностях микротрещин и микрополостей, чем способствует развитию сегрегации кристаллов и созданию неоднородности химического состава металлов и сплавов. В зависимости от природы металла и условий его насыщения водородом образуются разные формы его состояния в металле, между которыми существует динамическое равновесие. Такое состояние водорода в стали подтверждено результатами исследований по определению фракционного состава газа в металлах. В обычных условиях молекулярный водород вступает в реакции лишь с немногими элементами, но при нагревании, превращаясь в радикал, взаимодействует со многими [2, 3].

Процессы наводороживания металла начинаются с взаимодействия его поверхностей с сопрягаемыми микроэлементами и микрочастицами, находящимися в окружающей среде. В результате взаимодействия ненасыщенных силовых полей твердого тела с силовыми полями молекул газа, движущихся к твердой поверхности, или взаимодействия жидкости, соприкасающейся с твердым телом, поверхность последнего покрывается пленкой веществ, содержащихся в окружающей среде: газов, паров воды и других жидкостей. Кроме того, в пленке находятся микрочастицы различных веществ и микроорганизмов из окружающего пространства, соприкасающегося с поверхностью твердого тела. Характер взаимодействий образующихся пленок с металлом определяется как свойствами самого металла, так и воздействием на него окружающей среды в поверхностных разделах фаз, а также интенсивностью физических и химических процессов, протекающих в металлоповерхностях и самом разделяющем слое [3–6].

Поверхность металла, взаимодействуя с химическими соединениями, свободными радикалами, микроорганизмами из окружающей среды (биофакторами) и продуктами их метаболизма, подвергается структурному разупрочнению и повреждению, что инициирует и ускоряет процессы электрохимической, химической

и биологической коррозии, способствующие выделению водорода. Образовавшиеся атомы и молекулы водорода адсорбируются металлом поверхностного слоя и накапливаются в нем. Экспериментально установлено, что поверхности трения стальных и чугунных деталей, подвергшиеся биокоррозионному разрушению, содержат повышенное количество водорода – до $38 \cdot 10^{-3}$ % мас. [6]. Например, из работ Д. Н. Гаркунова известно, что даже титан становится хрупким при содержании водорода более $25 \cdot 10^{-3}$ % мас. Такое количество водорода в металле можно объяснить только результатом взаимодействия поверхностного слоя металла с окружающим пространством и композиционным составом техногенной среды, при котором протекают физические, трибо- и биохимические процессы с выделением водорода и последующей адсорбцией его металлом. Адсорбированный водород внутри металла преобразуется в молекулярный по следующей зависимости:



Исследования структуры поверхностного слоя детали узла трения транспортера уборки отходов сельскохозяйственных животных до и после биокоррозионного разрушения показали (рис. 1), что структура поверхности детали до биокоррозионного повреждения (рис. 1а) является цельной и однородной без каких бы то ни было внутренних дефектов, в то время как в структуре поверхностного слоя металла детали, выработавшей ресурс (рис. 1б), отчетливо видны следы биокоррозионного разрушения поверхностного слоя. Они представляют собой суб- и микротрещины, раковины и каверны, в которых могут легко накапливаться выделяющиеся при коррозии химически активные радикалы, метаболиты и газы, в том числе и адсорбционный водород [7].

Наводороживанию подвергается относительно тонкий поверхностный слой, имеющий специфическое напряженно-деформированное состояние. Этот слой образуется в результате механической или термической обработки металла и значительно отличается от глубинных слоев по своей микроструктуре. Максимальное наводороживание приходится на слой толщиной около 40 мкм, но при возникновении растя-

гивающих напряжений в металле не только увеличивается количество водорода в нем, но и смещается максимум водородсодержания в его глубину [3, 6].

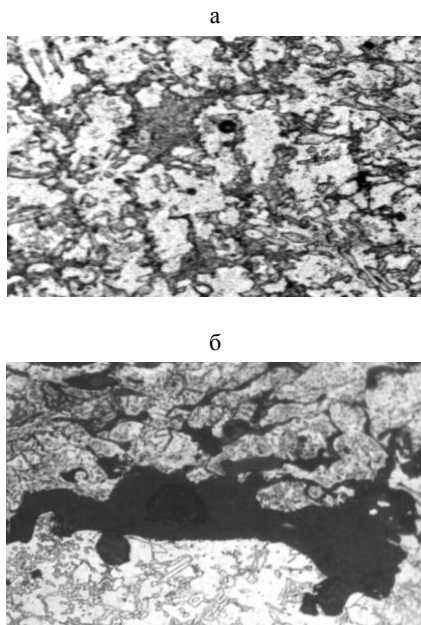


Рис. 1. Структура трибоповерхности оси транспортера, $\times 500$: а – поверхность детали заводского изготовления (до биокоррозионного поражения); б – поверхность детали, выработавшей ресурс (после биокоррозионного разрушения)

Накопление дислокаций и растягивающие внутренние напряжения благоприятствуют возникновению суб- и микроколлекторов, заполняющихся водородом, молизирующимся в них. Кроме коллекторов, заполненных молекулярным водородом, атомарный (диффузионно-подвижный) водород попадает в ловушки внутренней структуры металла (вакансии, дислокации, области объемного растяжения кристаллической решетки), обусловленные полями внутренних локальных микронапряжений, где он также молизуется. Накопление повреждений в структуре поверхностного слоя металла и аномально высокое насыщение его водородом при циклическом деформировании приводят к структурному разупрочнению, разрыхлению и разрушению поверхностного слоя с последующим его наводороживанием. Наводороживание металла неразрывно связано с разрушением структуры и потерей физико-механических свойств, поэтому его следует рассматривать как начальный этап водородного износа и разру-

шения, т. е. процессов водородного изнашивания, охрупчивания и растрескивания металла.

Насыщение металла водородом происходит благодаря его диссоциации на поверхности металла при образовании различных химических комплексов и радикалов, а также при деструкции клеток живых микроорганизмов. В [1–7] отмечено, что одним из существенных источников образования водорода являются процессы микробиологического синтеза, протекающие на поверхности металла при наличии биологического фактора, который инициирует биокоррозионные процессы. Структура поверхностного слоя металла, подвергшегося биокоррозионному разрушению и наводороживанию, представлена на рис. 2. В верхней части поверхностного слоя толщиной 0,075–0,200 мм отчетливо виден поврежденный биокоррозией тонкий поверхностный слой металла с характерными повреждениями и разрушениями структуры. Под биоповрежденным поверхностным слоем формируются локальные очаги разрушения целостности структуры основного металла в виде внутренних микродефектов (трещины, пустоты, полости, коллекторы и пр.), в которых происходит накопление водорода. Известно [8, 9], что трещины зарождаются в зоне максимальных растягивающих напряжений, в вершинах микродефектов, расположенных у поверхности металла по границам зерен.

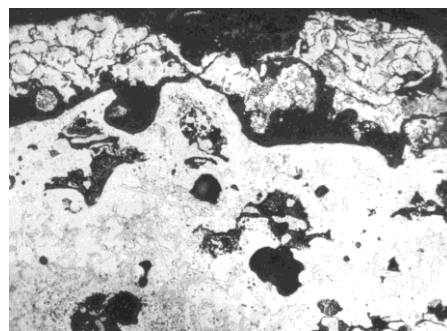


Рис. 2. Структура поверхностного слоя стального образца, подвергшегося коррозионному разрушению и наводороживанию, $\times 500$

Развитие трещин приводит к образованию микропустот и их соединению (слиянию) с другими внутренними микродефектами, находящимися под высоким давлением водорода, т. е. происходит водородное растрескивание.

Образуются трещины, в основном транскристаллитные. Во всех подобных случаях растрескивание металла вызывают атомы водорода, проникающие внутрь его либо в результате коррозионных реакций, либо при катодной поляризации. Водород, проникая внутрь металла, получает доступ к новым внутренним поверхностям дефектов его структуры и при их резком увеличении взаимодействует с ними, способствуя интеркристаллитному растрескиванию металла. Накопление повреждений структуры металла и аномально высокое насыщение его водородом приводят к заметному ухудшению таких механических характеристик металла, как выносливость при циклическом деформировании [9]. Одной из основных причин этого является наводороживание металла с формированием поверхностного водороднасыщенного слоя. Знакопеременное деформирование насыщенного водородом слоя приводит к некоторому перераспределению водорода по глубине металла, толщина водороднасыщенного слоя увеличивается, максимум водородсодержания сглаживается, но затем происходит движение водорода в глубь объема материала, сопровождающееся микрорастрескиванием.

Механизм растрескивания металла объясняется развитием внутреннего давления, вызванного скоплением в пустотах и других благоприятных местах газообразного водорода, образующегося при молизации атомарного водорода, растворенного в кристаллической решетке. Кроме того, диффузия и адсорбция водорода в вершинах трещин снижают поверхностную энергию атомов напряженного металла. Особенностью водородного растрескивания является специфическая задержка в появлении трещин после приложения нагрузки. Задержка перед появлением трещин связана с тем, что для диффузии водорода к специфическим участкам вблизи ядра трещины и для достижения достаточной для разрушения концентрации требуется время. Эти специфические участки окружены дефектами, возникающими в результате пластической деформации металла. Атомы водорода из кристаллической решетки, диффундируя к дефектам, переходят в более низкое энергетическое состояние. Трещина распространяется прерывисто, так как каждому последующему шагу ее роста предшествуют пла-

стическая деформация, затем диффузия водорода к дефектам. Любые факторы, снижающие растворение водорода в стали, повышают ее устойчивость к растрескиванию. Например, сплавления металла с небольшими количествами платины или палладия катализируют образование молекулярного водорода на поверхности стали, а легирование металла медью, алюминием и кальцием тормозит коррозионные процессы за счет образования пленок сульфидов и патины, что повышает стойкость металла к наводороживанию [3, 9, 10].

Процессы водородного изнашивания и разрушения неразрывно связаны с накоплением водорода в дефектах как поверхностного слоя металла, так и внутри его, которое приводит к созданию высоких внутренних напряжений в местах концентрации водорода и образованию микро- и макротрещин. Кинетика механизмов изнашивания поверхностей деталей машин [4, 5] и результаты выполненных исследований позволяют заключить, что механизм разрушения металлов водородом протекает по следующей закономерности.

1. Образование на металлоповерхностях тонких пленок из водородсодержащих химических соединений и водородообразующих микроорганизмов с питательной средой; адгезия молекул химических соединений, микроорганизмов и продуктов их метаболизма с поверхностью металла и образование на ней зон (пятен) коррозионной активности.

2. Биоценоз и синтрофизм микроорганизмов в зонах коррозионной активности, зарождение и протекание электрохимических, химических и биохимических реакций, деструкция клеток и молекул соединений под воздействием физических, химических и биологических факторов с образованием химически активных элементов и свободных радикалов, в том числе и водорода.

3. Разрыхление структуры поверхностного слоя металла, нарушение ее целостности и однородности, изменение микро- и макрогеометрии, рост и увеличение ультрамикроскопических дефектов поверхности в виде трещин и раковин, количество которых постоянно растет в результате воздействий коррозионных и химических процессов, что создает систему дефектов – слабых мест поверхности металла, так называемых очагов повреждений.

4. Образование очагов повреждений поверхности, усиление адсорбции металлом водорода и свободных радикалов, проникновение их в глубь металла в межкристаллитное пространство и кристаллическую решетку способствуют зарождению и развитию внутренних субмикро- и микротрещин, распространяющихся по всему объему металла.

5. Адсорбированный металлом водород в образовавшихся трещинах и дефектах структуры накапливается и молизуется. Накопление и молизация водорода в ограниченном пространстве металла приводят к образованию в нем газа и созданию высоких локальных внутренних напряжений, которые разрушают атомные связи и структуру кристаллической решетки, чем инициируется трещинообразование.

6. Насыщение водородом металла по всему объему приводит к его расположению в междузлиях кристаллической решетки: металл теряет пластичность и происходит водородное охрупчивание; дальнейшее насыщение металла водородом при одновременном воздействии растягивающих напряжений приводит к водородному растрескиванию. Трещины при водородном растрескивании в основном транскристаллитные.

ВЫВОД

Предлагаемая кинетика механизма водородного разрушения металлов позволяет расширить представление о физике процессов изнашивания и разрушения металлов, глубже понять причины и механизмы потери работоспособности узлов и деталей машин, работающих в контакте с техногенными биокоррозионными и водородсодержащими средами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ивашко, В. С.** Разрушение микроорганизмами материалов деталей машин и механизмов по производству и переработке сельхозпродукции / В. С. Ивашко, В. В. Кураш, А. В. Кудина // *Агропанорама*. – 2007. – № 2. – С. 36–40.
2. **Кондратьева, Е. Н.** Молекулярный водород в метаболизме микроорганизмов / Е. Н. Кондратьева, И. Н. Гоготов. – М.: Наука, 1981. – 344 с.
3. **Шелег, В. К.** Водородостойкие защитные материалы для деталей трения машин и оборудования, работающих в техногенных водородсодержащих средах / В. К. Шелег, А. Ф. Присевок // *Вестник Белорусского национального технического университета*. – 2007. – № 3. – С. 15–22.

4. **Исследование** состава коррозионно-стойких металлопокрытий с низкой водородопроницаемостью, сформированного методом наплавки / В. В. Кураш [и др.] // *Агропанорама*. – 2011. – № 2 – С. 35–39.

5. **Ивашко, В. С.** Теоретические аспекты кинетики изнашивания поверхностей деталей машин и механизмов / В. С. Ивашко, В. В. Кураш, А. В. Кудина // *Вестник Белорусского национального технического университета*. – 2005. – № 5. – С. 59–63.

6. **Гаркунов, Д. Н.** Виды трения, изнашивания и эксплуатационные повреждения деталей машин / Д. Н. Гаркунов, П. И. Корник, Э. Л. Мельников // *Ремонт, восстановление, модернизация*. – 2007. – № 7. – С. 43–49.

7. **Кураш, В. В.** Исследование наводороживания металлоповерхностей деталей рабочих органов машин, агрегатов и сборочных единиц сельскохозяйственной техники / В. В. Кураш, Ю. И. Титов, А. В. Кудина // *Агропанорама*. – 2010. – № 3. – С. 39–42.

8. **Трение, износ и смазка** (Трибология и триботехника) / А. В. Чичинадзе [и др.]; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.

9. **Панасюк, В. В.** Механика разрушений и прочность материалов: справ. пособие: в 4 т. / под общ. ред. В. В. Панасюка. – Т. 4: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов. – Киев: Наук. думка, 1990. – 680 с.

10. **Спиридонов, Н. В.** Коррозионная стойкость медьсодержащих металлопокрытий, наплавленных с применением ультразвуковых колебаний / Н. В. Спиридонов, В. В. Кураш, А. В. Кудина // *Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки*. – 2008. – № 8. – С. 73–76.

REFERENCES

1. **Ivashko, V. S., Kurash, V. V., & Kudina, A. V.** (2007) Material Destruction of Parts for Machinery and Mechanisms for Production and Processing of Agricultural Products. *Agropanorama*, 2, 36–40.
2. **Kondratieva, E. N., & Gogotov, I. N.** (1981) *Molecular Hydrogen in Microorganism Metabolism*. Moscow: Nauka.
3. **Sheleg, V. K., & Prisevok, A. F.** (2007) Hydrogen-Resistant Protective Materials for Friction Parts of Machines and Equipment, Operating in Technogenic Hydrogen-Containing Media. *Vestnik BNTU [Bulletin of Belarusian National Technical University]*, 3, 15–22.
4. **Kurash, V. V., Kudina, A. V., Lisai, N. K., & Lisai, A. N.** (2011) Investigation on Composition of Corrosion Resistant Metal Coating with Low Hydrogen Permeability Formed With the Help of Welding Deposition Method. *Agropanorama*, 2, 35–39.
5. **Ivashko, V. S., Kurash, V. V., & Kudina, A. V.** (2005) Theoretical Kinetics Aspects of Machine Part And Mechanism Surface Wear. *Vestnik BNTU [Bulletin of Belarusian National Technical University]*, 5, 59–63.
6. **Garkunov, D. N., Kornik, P. I., & Melnikov, E. L.** (2007) Types of Friction, Wear and Operational Damages of Machinery Parts. *Remont, Vostanovlenie, Modernizatsia [Repair, Restoration, Modernization]*, 7, 43–49.
7. **Kurash, V. V., Titov, Yu. I., & Kudina, A. V.** (2010) Investigations of Hydrogen Absorption of Metal Surfaces of

Operational Organ Parts of Machinery, Apparatuses and Assembled Units of Agricultural Equipment. *Agropanorama*, 3, 39–42.

8. Chichinadze, A. V., Berliner, E. M., Braun, E. D., Bushe, N. A., Buianovskii, I. A., Gekker, F. R., Goriacheva, I. G., Grib, V. V., Demkin, N. B., Dobychin, M. N., Evdokimov, Iu. A., Zakharov, S. M., Kershenbaum, V. Ia., Luzhnov, Iu. M., Mamkhegov, M. A., Mikhin, N. M., & Romanova, A. T. (2003) *Friction, Wear and Lubrication (Tribology and Triboengineering)*. Moscow: Mashinostroenie.

9. Panasiouk, V. V. (1990) *Mechanics of Destruction and Strength of Materials. Vol. 4: Fatigue and Cyclic Crack-resistance of Constructional Materials*. Kiev: Naukova Dumka.

10. Spiridonov, N. V., Kurash, V. V., & Kudina, A. V. (2008) Corrosion Resistance of Copper-Containing Metal Coatings Welded While Applying Ultrasound Oscillations. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya B. Prikladnye Nauki. Promyshlennost'*. [Vestnik of Polotsk State University. Series B. Applied Sciences. Industry], 8, 73–76.

Поступила 27.01.2014

УДК 656.07

ПАРАДОКСЫ ЭВОЛЮЦИИ АВТОМОБИЛЕЙ

Докт. техн. наук, проф. ГРАБАУРОВ В. А.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: Vladimir.Grabaurov@yandex.ru

PARADOXES OF AUTOMOTIVE EVOLUTION

GRABAUROV V. A.

Belarusian National Technical University

Проведен исторический анализ тенденций эволюции автомобилей. Показано, как от первых автомобилей под влиянием гонки за их скоростью и мощностью пришли к автомашинам мощностью в несколько сотен лошадиных сил. Скорость движения в городах на порядок меньше технических возможностей автомобилей, появились серьезные проблемы с экологией и безопасностью движения. Решение проблем безопасности движения возможно только при создании умных автомобилей на умных дорогах в рамках интеллектуальных транспортных систем.

Ключевые слова: автомобиль, мощность и скорость автомобилей, экологические проблемы, дорожно-транспортные происшествия, интеллектуальная транспортная система.

Ил. 5. Библиогр.: 5 назв.

The paper presents a historical analysis of tendencies pertaining to automotive evolution. It has been shown how motivation to higher speed and capacity had made it possible to manufacture automobiles with several hundred horsepower capacity. Traffic speed in the cities is rather less than technical capabilities of automobiles; there are serious ecological and traffic safety problems. Solution of serious traffic safety problems is possible only while developing clever automobiles for clever traffic roads within the framework of intelligent transportation systems.

Keywords: automobile, capacity and speed of automobiles, ecological problems, road and transport accidents, intelligent transportation system.

Fig. 5. Ref.: 5 titles.

Введение. Автомобиль, как реализация человеческой мечты о самодвижущихся повозках для перемещения людей и грузов, создавался и интенсивно совершенствовался более двухсот лет. Промышленная революция дала мощный толчок развитию автомобилей. Вначале ис-

пользовались паровые двигатели, а с изобретением двигателей внутреннего сгорания их начали устанавливать на автомобилях. Собственно понятие «автомобиль» начало применяться именно с появлением машин с двигателями внутреннего сгорания.