

OPTIMA@home i SAT@home // Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. – 2012. – № 5-2. – S. 340–347.

17. Intel 64 and IA-32 Architectures Software Developer's Manual. Combined Volumes: 1, 2A, 2B, 2C, 3A, 3B and 3C. Intel press, order number 325462-052US, 2014. – 3439 p.

18. Procedurno-modul'noe programirovanie na Delphi: uchebnoe posobie / S.G. Emel'janov, Je.I. Vatutin, V.S. Pa-

nishhev, V.S. Titov. – M.: Argamak-Media, 2014. – 352 s.

19. Biere A., Heule V., van Maaren H., Walsh T. (eds.). Handbook of Satisfiability. IOS Press, 2009. – 980 p.

20. Soos M., Nohl K. Extending SAT Solvers to Cryptographic Problems // Proceedings of the 12th International Conference on Theory and Applications of Satisfiability Testing (SAT'09), 2009. – P. 244–257.

УДК 620.1

**М.Е. Ставровский**, д-р техн. наук, профессор, ФБУ «Научно-исследовательский центр по проблемам управления ресурсосбережением и отходами» (Москва) (e-mail: stavrov@list.ru)

**М.И. Сидоров**, канд. техн. наук, ФКП «НИИ «Геодезия» (Москва) (e-mail: stavrov@list.ru)

**С.Г. Емельянов**, д-р техн. наук, профессор, ректор ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: rector@swsu.ru)

**С.П. Посеренин**, д-р техн. наук, профессор, ГБОУ МО «Технологический университет» (Москва) (e-mail: sp0110@mail.ru)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО НАВОДОРОЖИВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДЕТАЛЕЙ

*Изучение механизма процессов изнашивания различных материалов невозможно без исследования значительного числа параметров, определяющих их энергетическое состояние и характеризующих их структурную приспособляемость к динамическим воздействиям. Со временем происходит нарушение равновесия генерируемых трением энергетических потоков. При этом изменяются необратимым образом и свойства материалов, что проявляется, в частности, в их способности к адсорбции водорода.*

*Взаимодействие деталей сопровождается энергетическими и структурными превращениями в металлах, которые вызывают повышение в их поверхностных слоях концентрации водорода, а также интенсивное выделение его в зону взаимодействия.*

*В качестве отклика процессов, происходящих в системах взаимодействующих материалов, авторами предложено использовать перераспределение в них концентрации диффузионно-подвижного водорода.*

*Авторами показано, что существует предел нагружения материалов деталей, соответствующий резкой интенсификации диффузии в них водорода, что согласуется с положениями теории структурной приспособляемости материалов. Определена необходимость установления данного предела для сочетаний материалов, назначаемых для узлов машин при проектировании.*

*Важным этапом при исследовании процесса наводороживания материалов деталей является определение температурного интервала и связанного с ним времени проведения экспериментов по измерению содержания водорода в металлах.*

*Экспериментально установлено, что все исследуемые материалы деталей наводороживаются различным образом в процессе эксплуатации. На степень их наводороживания значительное влияние оказывают режимы работы узлов. Факторами, определяющими перераспределение водорода, являются, прежде всего, удельные нагрузки на поверхности деталей и их температура.*

**Ключевые слова:** узлы трения, материал, изнашивание, наводороживание, предел нагружения, смазочная среда, режимы взаимодействия.

\*\*\*

Изучение механизма процессов изнашивания различных материалов невозможно без исследования значительного числа параметров, определяющих их энергетическое состояние и характеризующих их структурную приспособляе-

мость к динамическим воздействиям [1, 4, 5]. Со временем происходит нарушение равновесия генерируемых трением энергетических потоков. При этом изменяются необратимым образом и свойства материалов, что проявляется, в частно-

сти, в их способности к адсорбции водорода. Процессы самоорганизации системы, протекающие при изменении воздействия внешних и внутренних факторов, связаны с ними детерминированными и корреляционными зависимостями, однако многообразие форм явлений, обуславливающих изнашивание материалов, определяет сложность получения прогностической математической модели процесса [2, 5].

Главной задачей системного подхода к анализу процессов в зоне взаимодействия материалов узлов трения является составление динамико-стохастической модели контроля за их состоянием. Динамическая часть модели должна обеспечивать управление и регулирование параметрами взаимодействия, а стохастическая – обеспечивать получение и обработку достоверной информации [1, 2]. Основные характеристики объекта формулируются с помощью уравнений, которые вводятся в модель в качестве обратной связи.

Исходя из энергетического баланса в системе узла трения [3, 4], можно предположить, что интенсивность выделения или поглощения и состав газообразных продуктов износа будет служить индикатором условий и режимов взаимодействия материалов деталей и смазочной среды и будет определенным образом связан с интенсивностью их изнашивания:

$$C_{Г.Ф} \propto W_R \propto \omega_{DR}^* J_h, \quad (1)$$

где  $C_{Г.Ф}$  – интенсивность выделения или поглощения газов.

Так как процесс водородного изнашивания материалов связан с образованием в зоне трения газообразного водорода в результате деструкции смазочного материала, можно предположить, что вызывающая водородное изнашивание часть мнимой плотности энергии  $\omega_{DR}^*$ .

$$\omega_{DR} = \sum_0^{n=i} \omega_{DRi} \quad (2)$$

(эта величина входит в общее выражение для мнимой плотности энергии) будет связана с интенсивностью выделения водорода:

$$C_{H_2} \propto K_B J_h \omega_{DR}^* \quad (3)$$

или

$$K_B \frac{J_h}{C_{H_2}} \propto \frac{1}{\omega_{DR}^*},$$

(4)

где  $K_B$  – коэффициент, характеризующий структурную приспособляемость материалов к воздействию водорода.

Эмпирический коэффициент  $K_B$  может изменяться в процессе трения. Определение этого коэффициента требует проведения дополнительных исследований. Поэтому для описания модели динамического взаимодействия на данном этапе следует ограничиться изучением взаимосвязи интенсивностей выделения водорода и изнашивания с применением методов планирования экспериментов.

Взаимодействие деталей сопровождается энергетическими и структурными превращениями в металлах, которые вызывают повышение в их поверхностных слоях концентрации водорода, а также интенсивное выделение его в зону взаимодействия.

В качестве отклика процессов, происходящих в системах взаимодействующих материалов, авторами предложено использовать перераспределение в них концентрации диффузионно-подвижного водорода.

Выделение водорода из металлических образцов проводили в термокамере при температуре 650 °С. В процессе триботехнических исследований контролировали содержание водорода в герметичной камере машины трения (ролик-колодка) с одновременной непрерывной регистрацией триботехнических характеристик.

Результаты, приведенные в таблице 1, отражают влияние процесса трения на наводороживание образцов сталей марок 45 и X12M. Для стали 45 концентрация диффузионно-подвижного водорода в образце возрастает после проведения одноцикловых триботехнических испытаний в среднем в 5 раз (с  $3 \cdot 10^{-2}$  об.% до  $14 \cdot 10^{-2}$  об.%), а для стали X12M - в 2,8 раза (с  $17 \cdot 10^{-2}$  об.% до  $46 \cdot 10^{-2}$  об.%).

Статистический анализ полученных данных показал, что объемное наводороживание образцов происходит практически одинаково. Относительное стандартное отклонение серии единичных определений концентрации экстрагированного из образцов водорода составляет  $S_r = 0,09$  для стали 45 и  $S_r = 0,13$  для стали X12M.

Таблица 1

Влияние процесса трения на содержание диффузионно-подвижного водорода в сталях (одноцикловые испытания: нагрузка – 0,5 кг, смазка - масло И20, материал колодки - сталь У7А)

| Материал ролика | Условия отбора проб | Средняя концентрация водорода, $C \pm \frac{tS}{\sqrt{n}}$ , $10^{-2}$ об.% | Число единичных определений, n | Относительное отклонение, $S_r$ |
|-----------------|---------------------|---|--------------------------------|---------------------------------|
| Сталь 45        | До трения           | $2,8 \pm 0,2$   | 5                              | 0,03                            |
|                 | После трения        | $14,0 \pm 0,6$  | 5                              | 0,09                            |
| Сталь X12M      | До трения           | $16,7 \pm 0,5$  | 6                              | 0,04                            |
|                 | После трения        | $46,1 \pm 0,7$  | 6                              | 0,13                            |

Кинетика выделения диффузионно-подвижного водорода из образцов до и после проведения триботехнических испытаний показана на рис. 1 (сталь 45) и рис.2 (сталь X12M). Кинетика как оценочная характеристика показывает увеличение объемного содержания водорода после трения.

Увеличение нагрузки на образцы из сталей X12M и 20X3МВФ более 20 МПа приводит к интенсификации процесса их наводороживания. Причем, если увеличение нагрузки с  $P=20$  МПа до  $P=25$  МПа привело к повышению концентрации водорода в стали X12M в 2,35 раза, то аналогичное изменение нагрузки до  $P=30$  МПа - соответственно в 4,5 раза (табл. 2).

Авторами показано, что существует предел нагружения материалов деталей, соответствующий резкой интенсификации диффузии в них водорода, что согла-

суется с положениями теории структурной приспособляемости материалов.

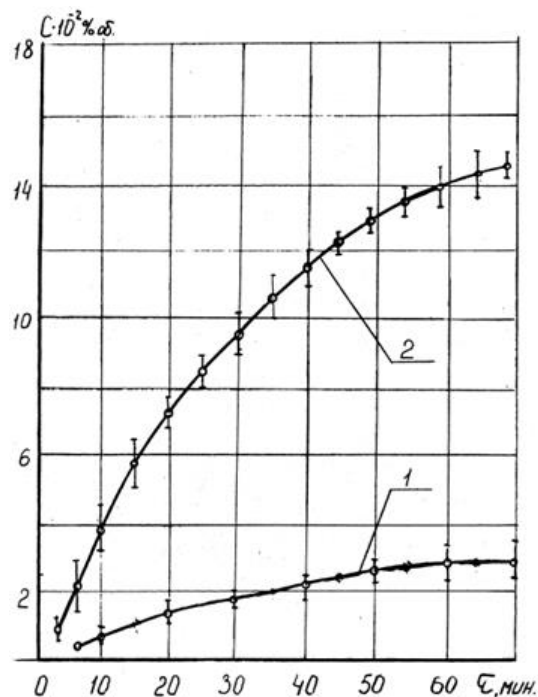


Рис. 1. Кинетика выделения диффузионно-подвижного водорода из стали 45 (при  $650^{\circ}\text{C}$ );

образцы изготовлены из материала одной поставки: 1 – до трения; 2 – после одноцикловых триботехнических испытаний

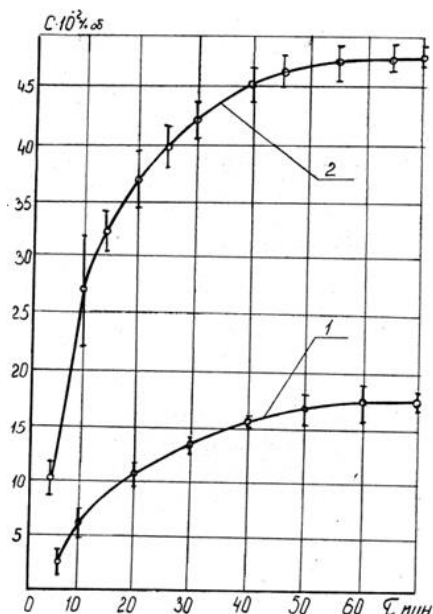


Рис. 2. Кинетика выделения диффузионно-подвижного водорода из стали X12M (при 650 °C); образцы изготовлены из материала одной поставки: 1 – до трения; 2 – после одноцикловых триботехнических испытаний

Определена необходимость установления данного предела для сочетаний ма-

териалов, назначаемых для узлов машин при проектировании.

В процессе эксплуатации контактные напряжения в материалах деталей узлов повышаются вследствие изнашивания поверхностей. Повышение удельных нагрузок на поверхности, как показано, может привести к интенсификации наводороживания материалов и при критической концентрации водорода в поверхностных слоях к катастрофическому износу на глубину дефектного слоя.

Полученные авторами результаты свидетельствуют о возможности оценки пределов нагружения материалов деталей по интенсивности их наводороживания и составления прогностических моделей с учетом дрейфа изменения параметров взаимодействия.

Во время испытаний режимы нагружения устанавливались, исходя из реальных условий эксплуатации деталей. Результаты экспериментов по определению наводороживания материалов деталей топливного плунжерного насоса приведены в таблице 2.

Таблица 2

Наводороживание материалов деталей топливного насоса в условиях триботехнических испытаний при различных режимах нагружения

| Наименование детали насоса | Материал детали | Удельная нагрузка на поверхность, МПа | Содержание водорода в материале, $10^{-9} \text{ м}^3/\text{кг}$ |
|----------------------------|-----------------|---------------------------------------|--|
| Плунжер                    | Сталь X12M      | 0                                     | 45   |
|                            |                 | 20                                    | 50   |
|                            |                 | 25                                    | 117,5  |
|                            |                 | 30                                    | 525  |
| Подпятник                  | Сталь 20ХН3МВФ  | 0                                     | 12,5   |
|                            |                 | 20                                    | 14   |
|                            |                 | 25                                    | 27   |
|                            |                 | 30                                    | 104  |
| Ротор                      | Сталь 12ХН3А    | 0                                     | 7  |
|                            |                 | 2                                     | 11   |
|                            |                 | 16                                    | 24   |

Диаграмма изменения суммарного линейного износа, температуры и момента трения, полученная на самописце триботехнической установки, отчетливо показывает, что изнашивание образцов характеризуется чередованием участков нормальной и повышенной интенсивности. Интервал между двумя участками соответствует величине износа, равной 1,5-2 мкм. Это объясняется накоплением водорода в поверхностных слоях образцов с последующим мгновенным разрушением материала на глубину дефектного слоя, чем характеризуется процесс водородного износа разрушением (ВИРАЗ). Удельная нагрузка на образец из стали Х12М, равная 30 МПа, является критической и недопустимой при эксплуатации насосов.

Важным этапом при исследовании процесса наводороживания материалов

деталей является определение температурного интервала и связанного с ним времени проведения экспериментов по измерению содержания водорода в металлах. На рис. 3 показана интенсивность выделения водорода из стали Х12М при температурах 300 °С и 650 °С. Температура, как видно из полученных данных, влияет на скорость десорбции водорода из стали, однако его содержание остается практически тем же. Исходя из этого, для определения содержания диффузионно-подвижного водорода в сталях, был выбран рабочий интервал применяемых в экспериментах температур нагрева образцов от 600 °С до 650 °С. Время, в течение которого происходит выделение водорода до установления максимальной его концентрации в термокамере, составляет порядка 80 мин.

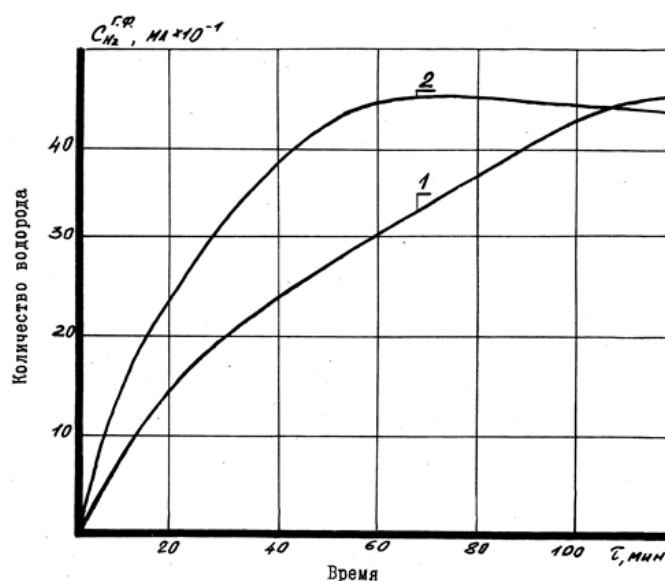


Рис. 3. Зависимость количества выделившегося из стали Х12М водорода во времени при различной температуре нагрева образцов: 1 – температура 300 °С; 2 – температура 650 °С

Экспериментально установлено, что все исследуемые материалы деталей топливных насосов наводороживаются различным образом в процессе эксплуатации. На степень их наводороживания

значительное влияние оказывают режимы работы узлов. Факторами, определяющими перераспределение водорода, являются, прежде всего, удельные нагрузки на поверхности деталей и их температура.

**Список литературы**

1. Канарчук В.Е. Адаптация материалов к динамическим воздействиям. - Киев: Наукова думка, 1986. – 264 с.

2. Лукашев Е.А., Ставровский М.Е. К построению математических моделей технической диагностики узлов трения // Теоретические и прикладные проблемы сервиса. – 2004. – № 1 (10). – С. 10 - 19.

3. Методы трибохимических исследований / Е.А. Лукашев, М.Е. Ставров-

ский, А.В. Олейник, С.Г. Емельянов, В.М. Юдин. - Курск, 2006. – 282 с.

4. Теоретические основы триботехнической диагностики / Е.А. Лукашев, М.Е. Ставровский, С.Г. Емельянов, А.В. Олейник. - Курск, 2009. – 151 с.

5. Трибохимия водородного износа / Е.А. Лукашев, М.Е. Ставровский, А.В. Олейник, В.М. Юдин, С.Г. Емельянов. – Курск, 2007. – 278 с.

*Получено 10.02.16*

**M.E. Stavrovsky**, Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, Research Center for Resource Conservation and Waste Management Issues" (Moscow) (e-mail: stavrov@list.ru)

**M.I. Sidorov**, Candidate of Engineering Sciences, PCF "Research Institute" Geodesy "(Moscow) (e-mail: stavrov@list.ru)

**S.G. Emelyanov**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Rector, Southwest State University (Kursk) (e-mail: rector@swsu.ru)

**C.P. Poserenin**, Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, University of Technology (Moscow) (e-mail: sp0110@mail.ru)

## **A STUDY OF HYDROGEN SATURATION OF MACHINE PART MATERIALS IN OPERATION PERIOD**

*It is not possible to study material wear processes without investigating multiple parameters that determine their energy state and specify their structural adaptability to dynamic impacts. Within a certain time period the balance between energy flows that are generated by friction gets upset. It causes irreversible changes in the properties of materials, which is specifically demonstrated by their ability to absorb hydrogen.*

*Interaction between machine parts is accompanied by energy and structural transformations in metals. It results in an increase of hydrogen concentration in metal surface layers with intensive hydrogen release into the interaction zone.*

*The authors of this paper suggest that the response of the processes running in the systems of interacting materials should be related with a redistribution of diffusion-mobile hydrogen concentration.*

*The authors have demonstrated that there is a limit of loading machine parts materials and it corresponds to a drastic intensification of hydrogen diffusion in them, which well agrees with the theoretical principles of material structural adaptability. They have also justified a need in determining such limits for material combinations that are used in machine parts design.*

*An important stage in the studies of the process of hydrogen saturation of machine part materials is to determine the temperature range together with the relevant time period of experimental studies devoted to measuring hydrogen concentration in metals.*

*It has been found experimentally that hydrogen saturation runs differently in the investigated materials of machine parts during their operation time. The rate of hydrogen saturation considerably depends on operation modes. Main factors determining hydrogen redistribution are the intensity of distributed load affecting the surfaces of machine parts and their temperature.*

**Key words:** friction unit, material, wear, hydrogen saturation, loading limit, lubricating medium, interaction modes

\*\*\*

**References**

1. Kanarchuk V.E. Adaptacija materijalov k dinamičeskim vozdejstvijam. - Kiev: Naukova dumka, 1986. – 264 s.

2. Lukashev E.A., Stavrovskij M.E. K postroeniju matematičeskih modelej

tehnicheskoy diagnostiki uzlov trenija // Teoreticheskie i prikladnye problemy servisa. – 2004. – № 1 (10). – S. 10 - 19.

3. Metody tribohimicheskikh issledovanij / E.A. Lukashev, M.E. Stavrovskij, A.V. Olejnik, S.G. Emel'janov, V.M. Judin. - Kursk, 2006. – 282 s.

4. Teoreticheskie osnovy triboteh-nicheskoy diagnostiki / E.A. Lukashev, M.E. Stavrovskij, S.G. Emel'janov, A.V. Olejnik. - Kursk, 2009. – 151 s.

5. Tribohimija vodorodnogo iznosa / E.A. Lukashev, M.E. Stavrovskij, A.V. Olejnik, V.M. Judin, S.G. Emel'janov. – Kursk, 2007. – 278 s.

УДК 629.7.05

**В.Г. Андронов**, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: vladia58@mail. ru)

**С.Г. Емельянов**, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск) (e-mail: rector @swsu.ru)

### МЕТОД АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

*Рассмотрены задачи ориентации и навигации космических аппаратов (КА) в околоземном координатном пространстве. Показано, что первая сводится к определению и приданию нужной ориентации осей связанной с корпусом КА системы координат относительно систем отсчёта, задающих положение КА на орбите и в инерциальном пространстве. Вторая задача связана с определением положения центра масс КА и скорости его движения в инерциальном пространстве. Даны определения и направления осей базовых систем отсчёта, к которым отнесены орбитальная и вторая экваториальная, и приборных систем, связанных со звёздными датчиками и целевой аппаратурой. К основным методам автономной навигации и ориентации космических аппаратов в околоземном космическом пространстве отнесены методы инерциальной навигации, основанные на измерении составляющих линейной скорости движения КА акселерометрами, а угловой скорости – гироскопами. При этом текущие координаты и угловая ориентация КА вычисляются путём интегрирования измеренных значений соответствующих скоростей. Современные акселерометры и гироскопы эффективно функционируют в широком диапазоне скоростей КА, однако их неустойчивыми недостатками являются «дрейф нуля» и «уход осей», которые обусловлены накоплением ошибок измерений из-за постоянного интегрирования линейных и угловых скоростей движения КА. Вследствие этого параметры поступательного и углового движения КА нуждаются в периодической коррекции в части положения центра масс КА в инерциальном пространстве и значений углов ориентации осей связанной с КА системы координат относительно осей базовых и приборных систем отсчёта. Рассмотрен метод автономного определения параметров круговой орбиты космических аппаратов в околоземном пространстве, который может быть использован для коррекции показаний датчиков инерциальной навигационной системы в условиях отсутствия спутниковых навигационных измерений.*

**Ключевые слова:** методы автономной навигации, звёздные датчики, космические аппараты.

\*\*\*

Для решения задач ориентации и навигации космических аппаратов (КА) в инерциальном пространстве в общем случае используются следующие три типа систем отсчёта [1-2]: приборная система координат (ПСК), связанная система координат (ССК) и базовая, которая в свою очередь включает в себя инерциальную систему координат (ИСК) и орбитальную систему координат (ОСК).

Задача ориентации сводится к определению ориентации осей ССК относительно осей ПСК, ОСК и ИСК и приданию им нужного направления, а навигации — пространственного положения

центра масс КА и составляющих скорости его движения в инерциальном пространстве. В околоземном космическом пространстве к базовым системам отсчёта относят вторую экваториальную ИСК и ОСК, а к ПСК – системы отсчёта звёздных, солнечных и других датчиков и/или целевой аппаратуры. Оси датчиков жёстко закреплены под априорно известными углами относительно ССК КА и ориентируются в процессе функционирования КА на геометрические центры соответствующих небесных тел [3-5]. При этом одну из осей целевой аппаратуры, например съёмочной аппаратуры дистанцион-