

УДК 621.432

ДИФФУЗИЯ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА В КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ РЕШЕТКУ ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Шалыгин М.Г., Ермаков Д.С.

Брянский государственный технический университет, Брянск, e-mail: migshalygin@yandex.ru

В статье рассмотрены причины водородного изнашивания поршневых колец двигателей внутреннего сгорания. Приведены причины появления атомарного водорода в зоне трения поршневых колец о стенку цилиндра. Установлено, что десорбция водорода из структуры поршневых колец и адсорбция водорода на поверхность поршневых колец незначительно влияют на их водородное изнашивание. Предложены расчетные зависимости, позволяющие определить степень диффузии атомарного водорода в кристаллическую решетку твердого тела. Выявлено, что основными факторами, влияющими на скорость водородного изнашивания, являются температура, давление, деформации, структура и дефекты кристаллической решетки. В статье приведена методика упрочнения подповерхностного слоя поршневых колец двигателей внутреннего сгорания, позволяющая снизить диффузию водорода, выделившегося из топлива, в кристаллическую решетку. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании поршневых колец двигателей внутреннего сгорания.

Ключевые слова: диффузия, атомарный водород, поршневые кольца, упрочнение, водородное изнашивание

DIFFUSION OF ATOMIC HYDROGEN INTO THE CRYSTAL LATTICE OF THE PISTON RINGS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Shalygin M.G., Ermakov D.S.

Bryansk State Technical University, Bryansk, e-mail: migshalygin@yandex.ru

The article discusses the causes of hydrogen wear of piston rings of internal combustion engines. Shown the reasons for the appearance of atomic hydrogen in the friction zone of the piston rings on the cylinder wall. Found that desorption of hydrogen from the structure of the piston rings and the adsorption of hydrogen on the surface of the piston rings slightly affect their hydrogen wear. Propose computational dependencies, allowing to determine the degree of diffusion of atomic hydrogen into the crystal lattice of the solid. It is revealed that the main factors affecting the rate of hydrogen wear are temperature, pressure, strain, structure, and lattice defects. In the article the technique of strengthening subsurface layer of the piston rings of internal combustion engines, those thereby reducing the diffusion of hydrogen released from the fuel into the crystal lattice. The research results can be used in the design and repair of piston rings of internal combustion engines.

Keywords: diffusion, atomic hydrogen, piston rings, hardening, hydrogen wear

Поршневые двигатели внутреннего сгорания являются самыми распространёнными тепловыми двигателями в современном мире. Главным рабочим элементом таких двигателей являются поршни, на которые посажены поршневые кольца. При работе двигателя происходит износ его поршневых колец. Износ происходит как вследствие взаимодействия с механическими деталями (стенками цилиндра и поршневыми канальцами), так и вследствие воздействия на них горячих отработанных газов. Ввиду присутствия в топливе водородной составляющей одним из видов изнашивания поршневых колец является изнашивание вследствие воздействия атомарного водорода [6]. Водородное изнашивание колец может проходить по нескольким различным направлениям.

В процессе трения из топлива выделяется водород, который затем посредством реакции диссоциации-рекомбинации переходит в атомарный водород $H_2 \leftrightarrow 2H$. Под действием градиентов концентраций, тем-

пературы и давления водород стремится в зону наименьшей концентрации водорода, наибольшей температуры и наименьшего давления. При этом на его движение также оказывают влияние структура металла, наличие легирующих элементов, наличие дефектов кристаллической решетки.

Совместно с диссоциацией водорода из топлива при трении происходит десорбция газов из металла (водород, азот, кислород). Газы устремляются ближе к поверхности металла, где создается градиент температуры. Вакансии, а также другие дефекты кристаллической решетки приводят к тому, что образуются зоны, в которые водород попадает из топлива. Однако по причине того, что в основном поршневые кольца изготавливают из высококачественных высокопрочных чугунов, содержание водорода в таких чугунах не превышает 0,01%. Таким образом, можно предположить, что десорбция водорода из поршневых колец в процессе трения не играет ключевой роли в процессе водородного изнашивания.

При трении микронеровности колец претерпевают пластические и упругие деформации. Незначительно изменяя объем элементарной ячейки, упругие деформации способствуют проникновению водорода в кристаллическую решетку, где атомарный водород создает твердые растворы внедрения или замещения. Пластические деформации способствуют созданию новых дефектов кристаллической решетки в глубине металла. Атомарный водород внедрения, перемещаясь по кристаллической решетке, находит нано- и микропоры, в которых собирается, молизуется и создает избыточные давления, что способствует разрушению металла.

Не менее способствует проникновению водорода в чугун температурное расширение. Поршневые кольца в результате воздействия высоких температур в небольших пределах изменяют свой диаметр, вследствие увеличения межмолекулярного расстояния атомов в кристаллической решетке. Это приводит к тому, что атомарный водород, обладающий наименьшим размером из всех известных элементов, встречает меньше преград на пути от поверхности в глубину твердого тела.

Как показатель степени диффузии водорода в кристаллическую решетку твердого тела можно использовать критерий, основанный на числе Кнудсена [5]:

$$Kn = \frac{\lambda}{L},$$

где λ – средняя длина свободного пробега молекул в газе; L – характерный размер сечения.

Под средней длиной свободного пробега молекулы понимается длина, которую молекула пролетает за время свободного

пробега от одного столкновения до следующего. В нашем случае под средней длиной свободного пробега молекулы понимается длина, которую молекула пролетает до столкновения с воображаемой стенкой, образованной двумя соседними молекулами. Тогда средняя длина свободного пробега молекулы

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2\sigma n}},$$

где σ – газокинетическое эффективное сечение молекулы; n – концентрация молекул.

Газокинетическое эффективное сечение молекулы в случае эффективного сечения рассеяния с учетом градиента температуры и градиента давления

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 + \frac{S \cdot P_H}{\text{grad } T \cdot \text{grad } P} \right),$$

где σ_0 – глубина потенциальной ямы; P_H – давление контртела на единицу площади тела, МПа; S – постоянная Саузерленда ($S_{H_2} = 72$); K ; $\text{grad } T$ – градиент температуры на поверхности тела, К; $\text{grad } P$ – градиент давления на поверхности тела, МПа.

Характерный размер сечения L для кристаллических тел можно определить из параметров кристаллической решетки. Так, с учетом того, что поршневые кольца изготавливают из высокопрочных чугунов с шаровидным графитом (рис. 1), можно принять за характерный размер сечения расстояние между слоями графита, равное $0,335 \text{ нм} = 335 \cdot 10^{-12} \text{ м}$.

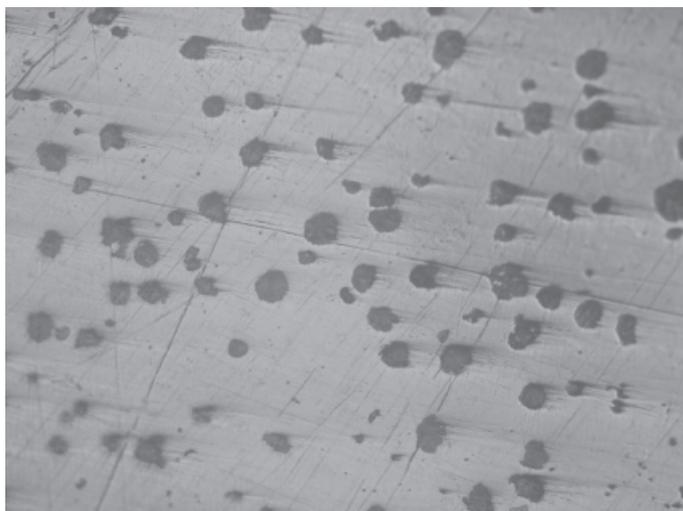


Рис. 1. Структура высокопрочного чугуна с шаровидным графитом

Концентрация молекул n водорода в зоне трения по сути является процессом диссоциации углеводородного топлива. Известно, что при работе поршневых колец происходит их интенсивное водородное изнашивание, при этом концентрация молекул водорода, выделившегося из топлива, превышает концентрацию молекул внутри водорода внутри поршневых колец, что приводит к образованию градиента концентрации $\text{grad } C$. Тогда, с учетом приведенных выше зависимостей,

$$Kn = \frac{1}{L} \left[2\sigma_0 \cdot \text{grad } C \left(1 + \frac{S \cdot P_H}{\text{grad } T \cdot \text{grad } P} \right) \right]^{-1/2}$$

Вероятно, влияние легирующих элементов, в общем, обусловлено также размерами кристаллической решетки и возможностью образования химического соединения легирующего элемента с водородом. Таким образом, при снижении концентрации биографического водорода в металле происходит снижение водородного изнашивания, даже несмотря на поступление водорода из топливной смеси.

Направление и скорость диффузии водорода определяют: температура в зоне трения, которая достигает наибольших значений на некоторой глубине от поверхности; упругие и пластические деформации в зоне трения и, как следствие, движение дислокаций; вакансии и коллекторы, где водород, молизуясь, создает высокие давления, тем самым ускоряя разрушение металла. При этом влияние структуры материала ограничено размерами кристаллической решетки каждой фазы, что, соответственно, будет влиять на скорость диффузии.

При адсорбции водорода на поверхность поршневых колец могут образовываться адсорбированные атомы или адатомы (рис. 2). Учитывая малый размер молекулы водорода, наличие температурного расширения колец и градиентов концентрации, давления и деформации, можно предположить, что количество образовавшихся адатомов незначительно. Кроме того, при трении существование градиента температуры по нормали к поверхности трения ведет к тому, что водород будет диффундировать в глубину металла. Из этого следует, что влияние образования адатомов водорода на водородное изнашивание поршневых колец невелико.

Влияние нанонеровностей поверхностей поршневых колец и стенки цилиндра двигателей внутреннего сгорания на диффузию водорода в первом приближении можно рассмотреть с точки зрения структуры кристаллической решетки [4].

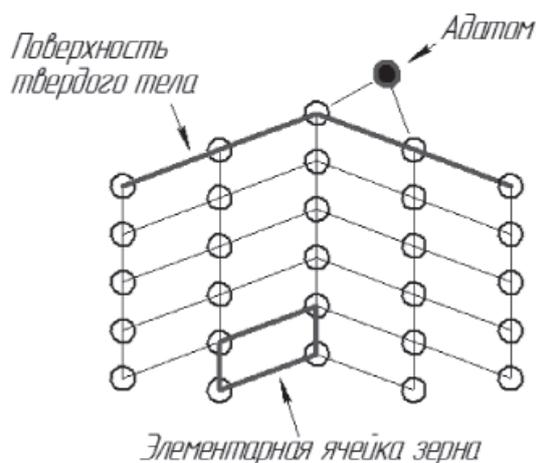


Рис. 2. Образование адатома водорода на границе кристаллической решетки

Таким образом, можно предположить, что основными факторами, влияющими на скорость водородного изнашивания, являются температура, давление, деформации, структура и дефекты кристаллической решетки. Общее уравнение диффузии водорода в таком случае по И.А. Одингу можно записать [2] как

$$\frac{dq}{d\tau} = D_0 \frac{\partial C}{\partial x} + D_\xi \frac{\partial \xi}{\partial x} - D_T \frac{\partial T}{\partial x},$$

где D_0, D_ξ, D_T – коэффициенты концентрации, деформации и температуры соответственно.

Известно, что наличие в структуре чугунов легирующих элементов, таких как марганец, хром, олово, молибден и некоторых других, снижают водородопроницаемость, а следовательно, и водородное изнашивание. Тогда повысить стойкость металлов к водородному изнашиванию при эксплуатационном периоде или в процессе ремонта возможно с помощью различных легирующих элементов.

Известно, что одним из элементов, наиболее снижающих водородопроницаемость, является кремний. Кремний имеет ионный радиус $42(+4e)271(-4e)$ пм и при взаимодействии с углеродом образует карбиды. Следовательно, если внедрить молекулы кремния в структуру кристаллической решетки, возможно получение карбидов на некоторой глубине от поверхности металла. Однако в таком случае возникает ряд задач:

- расщепление порошкообразного кремния на молекулы;
- увеличение параметров кристаллической решетки чугуна или стали с целью точечного направления в нее молекул кремния;
- занятие молекулами кремния вакансий в кристаллической решетке и как следствие карбидизация подповерхностной структуры металла.

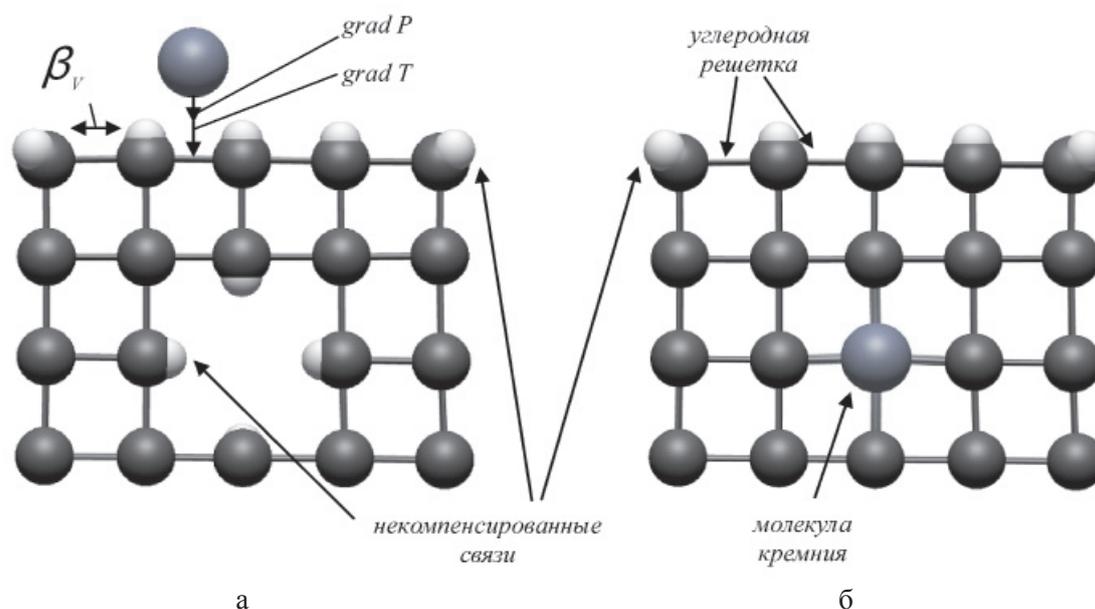


Рис. 3. Структура кристаллической решетки:
 а – наличие вакансии в кристаллической решетке; б – занятие вакансии молекулой кремния

На рис. 3 приведена схема насыщения приповерхностного слоя металла кремнием.

Перед проведением насыщения образцы подвергаются обезводороживанию по методике, предложенной в работе [3], с целью снижения концентрации биографического водорода в металле. Известно, что обезводороживание снижает концентрацию водорода в приповерхностном слое лишь на незначительный промежуток времени [1], поэтому время между завершением процесса обезводороживания и началом процесса насыщения должно быть минимально.

Образцы на подложке помещаются в герметичную камеру, «обсыпаются» порошкообразным кремнием. Расширение кристаллической β_V решетки производится в камере под действием температуры не более 457 К для сталей и не более 607 К для чугунов. При данных температурах фазовые превращения в используемых металлах не оказывают влияния на процесс насыщения. Образцы нагреваются до приведенных температур и выдерживаются в течение 10 минут.

Выделение молекул кремния и направление его в «сторону» металла осуществляется с помощью лазерного луча (10 ГДж/с), направленного от стенок камеры в сторону насыщаемого металла. При описанной выше технологии молекулы кремния в большинстве осадут на поверхности насыщаемого металла. С целью создания градиента давлений камеру насыщают аргоном

и создают в камере избыточное давление. При использовании аргона число молекул кремния, осаждаемых на поверхности металла снижается в 5–7 раз, следовательно, значительно большая часть молекул проникает в кристаллическую решетку.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что уменьшить водородное изнашивание поршневых колец двигателей внутреннего сгорания можно замещением вакансий, существующих в кристаллической решетке металла, молекулами кремния и созданием в приповерхностном слое металла износостойких карбидов.

Список литературы

1. Защита от водородного износа в узлах трения / Колл. авт.; под ред. А.А. Полякова. – М.: Машиностроение, 1980. – С. 135.
2. Крагельский, И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
3. Матюшенко В.Я., Соловей Н.Ф., Тороп В.В. Исследование водородного износа цилиндропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания // Эффект безызносности и триботехнологии. – 1997. – № 1. – С. 33–39.
4. Суслов А.Г., Порошин В.В., Шалыгин М.Г., Кузнецов С.В. Взаимосвязь нанонеровностей (субшероховатости) поверхности деталей и зернистости материала // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2015. – № 11. – С. 3–7.
5. Храмов Ю.А. Физики: Биографический справочник / под ред. А.И. Ахиезера. – 2-е изд., испр. и дополн. – М.: Наука, 1983. – 400 с.
6. Шалыгин М.Г. К вопросу о водородном изнашивании и пластической деформации при трении // Техника и технологии – 2014: материалы Международной научно-технической конференции (Брянск, 23–25 июня 2014 г.). – Брянск: НДМ, 2014. – С. 6–14.