

УДК 621.923.6.025
DOI: 10.12737/20594

М.Г. Шалыгин, к.т.н.
(Брянский государственный технический университет,
241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7)
E-mail: migshalygin@yandex.ru

Формирование структуры в поверхностном слое деталей машин методами высоковакуумного отжига и ионной имплантации

Рассмотрены проблемы снижения водородного изнашивания стальных деталей, работающих в водородной среде. Проведены высоковакуумный отжиг и имплантация ионов кремния в поверхность стальных образцов. Приведены технология и режимы высоковакуумного отжига ионной имплантации кремния. Представлены результаты экспериментальных исследований изменения фазовой структуры поверхностного слоя.

Ключевые слова: высоковакуумный отжиг; ионная имплантация; фазовое превращение; поверхностное упрочнение.

M.G. Shalygin, Can.Eng.
(Bryansk State Technical University,
7, 50 Years of October Boulevard, Bryansk 241035, Russia)

Structure formation in surface layer of machine parts by methods of high-vacuum annealing and ion implantation

This paper reports the problems of hydrogen wear decrease in steel parts operating in hydrogen medium. The friction couples of particular machine parts subjected to hydrogen wear are shown. Steel grades of the samples analyzed and their hardness are pointed out. The technologies of high-vacuum annealing and ion implantation used in investigations are described. The modes for the carrying out of high-vacuum annealing and ion implantation of silicon into a surface of the samples investigated are presented. It is determined that in a surface layer after the carrying out of high-vacuum annealing and ion implantation appear new structures with their form similar to roundish spots. The dimensions of spots and their distribution according to depth are defined. The sample breaking tests are carried out. It is established that technological operations carried out affect only the surface layers of samples. The investigation results can be used at the analysis of methods for hydrogen wear decrease of parts operating in hydrogen medium.

Keywords: high-vacuum annealing; ion implantation; phase change; surface strengthening.

В большинстве случаев, наряду с другими видами изнашивания [1, 2] в процессе трения деталей машин активное участие принимает водород. Водород присутствует, как и в смазывающих материалах, так и в окружающей среде и в самих трущихся деталях. Однако когда детали пар трения работают в углеводородных средах, зачастую водородное изнашивание становится основной причиной выхода из строя узлов трения. Для снижения негативного воздействия водорода, зачастую, применяют специальные чугуны с графитосодержащей структурой. Такие чугуны более устойчивы к водородному изнашиванию, по сравнению со сталями, в следствии наличия сложной кристаллографической структуры. Однако в некоторых случаях там, где это целесообразно, используются детали, изготовленные из сталей [3].

Исследованию воздействия водородного изнашивания стали посвящено большое количество работ [4, 5]. В научной литературе неоднократно приводятся исследования посвященные повышению водородной стойкости стальных деталей при трении. Однако значительная часть этих исследований обсуждает детали узлов трения, работающих в вакуумной среде [6, 7], где водородное изнашивание наиболее актуально. В то же время, немалая часть узлов трения, работающих в условиях водородосодержащей среды, также в значительной мере подвержено водородному изнашиванию.

В частности, при производстве битумных шестеренных насосов из сталей различных марок изготавливают такие детали как шестерни, вставки и др. Одним из элементов, которые в большей степени подвержены водород-

ному изнашиванию являются зубья шестерен [8]. В связи со сложным профилем зубьев их поверхностное упрочнение носит весьма затруднительный характер, что еще обусловлено и тем, что качество поверхности зуба должно соответствовать требованиям нормативных документов.

Незначительные отклонения в профиле зуба или качестве его поверхности приводит к сильным шумам при эксплуатации. Так, на некоторых промышленных предприятиях используются шестеренные насосы, шестерни которых изготовлены из сталей марок 45, 40Х, 60Г. Водородное изнашивание стальных шестерен, при перекачивании битумных мастик и эмульсий является основной причиной выхода из строя насосов и остановки линии подачи битума. Поэтому исследование способов повышения водородной стойкости зубьев стальных шестерен, без «ущерба» профилю зуба, имеет научно-практическое значение.

В настоящей работе представлены экспериментальные исследования повышения водородной стойкости стальных деталей совокупностью методов высоковакуумного отжига и ионной имплантации. Образцы были изготовлены из сталей марок 45 и 40Х и закалены до твердости 48...52 HRC. Высоковакуумный отжиг проводился на установке [5], схема которой приведена на рис. 1.

Перед загрузкой образцов в камеру они промывались бензином и четыреххлористым углеродом. После этого камера герметизировалась и проводилась откачка воздуха до давления $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па. При достижении вакуума в $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па включалась электропечь и камера разогревалась до температуры 523 К. О начале десорбции водорода из образцов судили по падению давления в камере. При достижении вакуума $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па при температуре 523 К электропечь выключалась, и при достижении температуры в камере 293 К в нее запускался воздух.

Приведенная технология высоковакуумного отжига снижает концентрацию водорода в поверхностном слое материала [9]. Однако, согласно [5], через некоторое время в условиях покоя концентрация водорода восстанавливается вследствие его десорбции из глубины материала в поверхностный слой. В этой связи, необходимо заполнить образовавшиеся при десорбции водорода «вакансии» до восстановления его концентрации во всем объеме образца.

Одним из элементов, способных снизить водородное изнашивание, является кремний.

Кремний имеет ионный радиус $42(+4e)271(-4e)$ пм, и при взаимодействии с углеродом образует карбиды. Внедрение ионов кремния в структуру кристаллической решетки после высоковакуумного отжига позволит не только создать карбиды в поверхностном слое, но и дает возможность ионам кремния занять вакансии, образовавшиеся после десорбции водорода. Энергия связи и коэффициент диффузии ионных пар определяются обоими ионами (рис. 2). Имплантация ионов кремния проводилась при следующих параметрах: энергия ионов $E = 400$ кэВ; плотность тока ионного пучка $j = 60$ мкА/см²; доза облучения $Q = 1000$ мкКул /см²; угол наклона ионного пучка 7° . Расширение кристаллической решетки β_V производилось в камере под действием температуры 457 К.

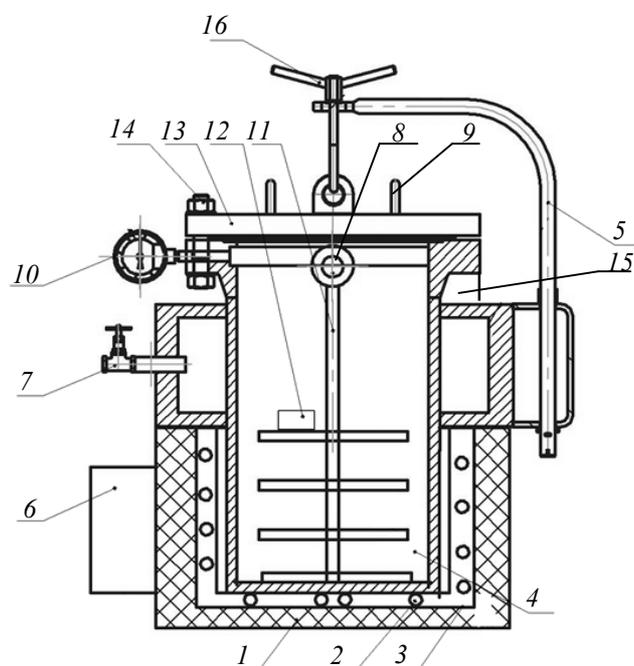


Рис. 1. Установка высоковакуумного отжига:

1 – корпус; 2 – ТЭН; 3 – теплоизоляционная обшивка; 4 – вакуумная камера; 5 – безмасленный насос; 6 – турбомолекулярный насос затвора вакуумного прогревочного; 7 – прогревочный вакуумный затвор; 8 – клапан; 9 – вакуумметр; 10 – датчик давления; 11 – пневмопривод; 12 – образец; 13 – крышка; 14 – винты; 15 – блок управления; 16 – рукоятка сброса давления

Во время исследований, с целью выявления структуры поверхности, обнаружены пятна округлой формы (рис. 3). Данные пятна, вероятнее всего, являются скоплением кремния в дефектах кристаллической решетки, образовавшихся после высоковакуумного отжига.

Средний диаметр пятен колеблется в пределах 20...25 нм. Целью дальнейших исследований стало изучение параметров данных пятен и их влияние на свойства материала.

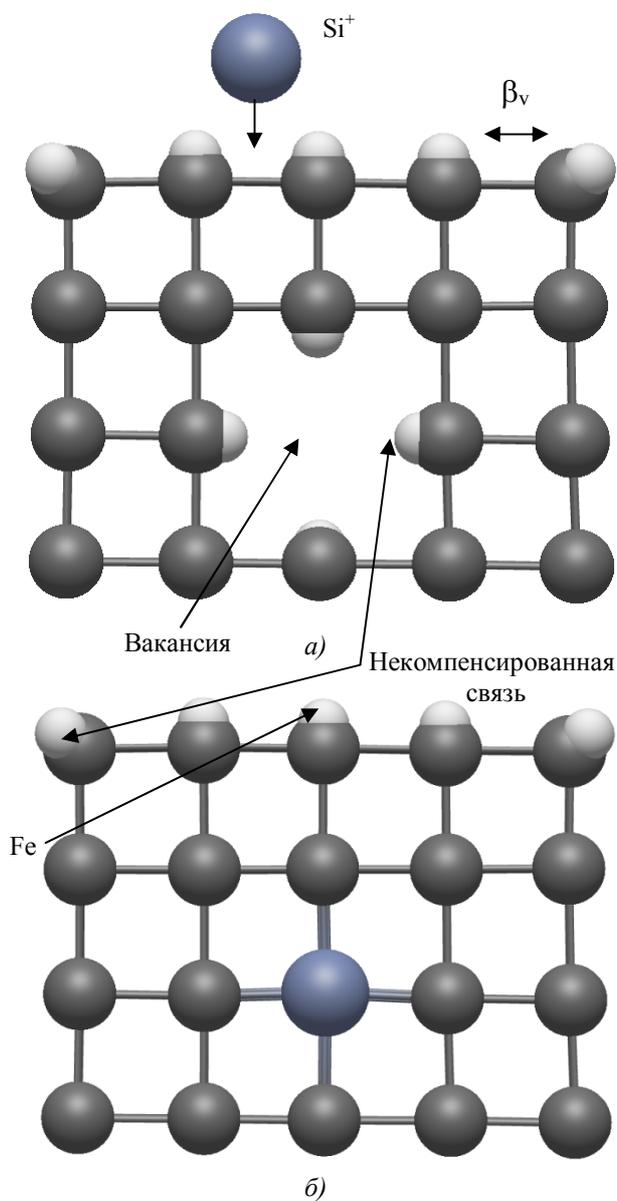


Рис. 2. Схема имплантации иона кремния:
a – имплантация иона кремния в кристаллическую решетку стали; *б* – занятие вакансии ионом кремния

С целью выявления влияния образовавшейся структуры на свойства детали были проведены испытания образцов на разрыв. Так, образцы, подвергнутые только термической обработке имели $\sigma_{0,2} = 770...790$ МПа, легированные кремнием – $\sigma_{0,2} = 780...810$ МПа, что подтверждает заключение о влиянии проведенных технологических операций только лишь на качество поверхностного слоя образцов.

Согласно проведенным расчетам глубина измененного слоя составляет 0,87 мкм. Учитывая, что имплантируемые ионы кремния внедряются в материал на глубину от 0,01 до 1,0 мкм, а также то, что распределение ионов имплантированного вещества по глубине по форме близко к гауссовскому распределению, можно утверждать, что наибольшей концентрации имплантированные ионы кремния достигают на глубине $\approx 0,43$ мкм.

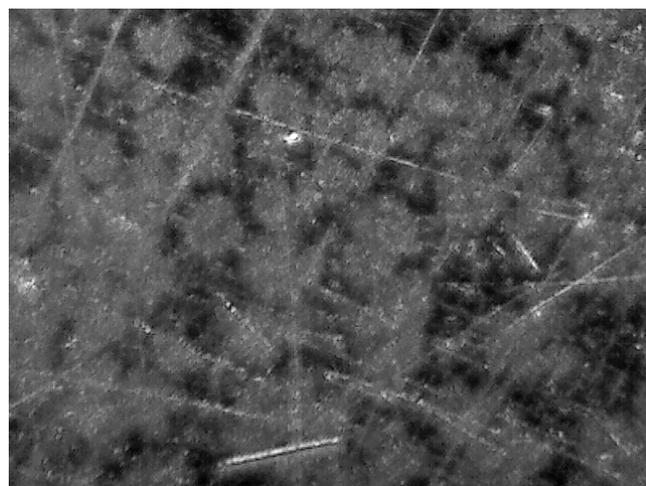


Рис. 3. Микрошлиф поверхности после высоковакуумного отжига и имплантации кремния

Таким образом, реализация предлагаемой технологии позволяет создать в поверхностном слое структуру по форме напоминающую скопление пятен, однако, для более детального изучения образовавшейся структуры необходимо провести исследования на микротвердость, изнашивание, структурный состав и физические свойства.

Следует учесть, что внедрение ионов в кристаллическую решетку материала приводит к появлению дефектов структуры. Выбитые из узлов решетки атомы железа приводят к образованию вакансий и дефектов структуры в виде внедренных межузельных атомов. Эти же дефекты возникают при застревании между узлами решетки ионов кремния. Такие дефекты образуют дислокации и целые дислокационные скопления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суслов А.Г., Богомолов Д.Ю., Шалыгин М.Г. Усталостное изнашивание поверхностей трения на уровне субшероховатости // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2015. – №4. – С. 7-10.

2. Суслов А.Г., Порошин В.В., Шалыгин М.Г. Адгезионный износ поверхности трения на уровне субшероховатости // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2015. – №7. – С. 29-31.

3. Рахмилевич З.З. Насосы в химической промышленности. – М.: Химия, 1990. – 240 с.

4. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность). – М.: МСХА, 2001. – 616 с.

5. Защита от водородного износа в узлах трения / Колл. авт.; под. ред. А.А. Полякова. – М.: Машиностроение, 1980. – 135 с.

6. Невшупа Р.А. Научные основы управления процессами трибодесорбции газов в узлах трения механизмов сверхвысоковакуумного оборудования электронной техники и нанотехнологий: дис. ... д-ра техн. наук. – Москва, 2010. – 671 с.

7. Клямкин С.Н. Неравновесные состояния и гистерезис сорбции-десорбции водорода в водородоаккумулирующих материалах: дис. ... д-ра хим. наук. – Москва, 2014. – 246 с.

8. Шалыгин М.Г. Водородное и абразивное изнашивание поверхностей деталей насосов при перекачивании углеводородов // Строительные и дорожные машины. – 2014. – №4. – С. 27–30.

9. 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.

REFERENCES

1. Suslov A.G., Bogomolov D.Yu., Shalygin D.G. Friction surface fatigue wear at subroughness level // *Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms*. – 2015. – №4. – pp. 7-10.

2. Suslov A.G., Poroshin V.V., Shalygin M.G. Friction surface adhesive wear at subroughness level // *Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms*. – 2015. – №7. – pp. 29-31.

3. Rakhmievich Z.Z. *Pumps in Chemical Industry*. – M.: Chemistry, 1990. – pp. 240.

4. Garkunov D.N. *Tribotechnology (Wear and Wearlessness)*. – M.: MAA, 2001. – pp. 616.

5. *Protection against Hydrogen Wear in Friction Units* / Group of authors; under the editorship of A.A. Polyakov. – M.: Mechanical Engineering, 1980. – pp.135.

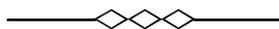
6. Nevshupa R.A. *Scientific Fundamentals in Processes of Gas Tribodesorption in Friction Units of Mechanisms of Super-vacuum Equipment of Electronic Technics and Nanotechnologies*: Thesis for a Doctor's degree. – Moscow, 2010. – pp. 671.

7. Klyamkin S.N. *Nonequilibrium States and Hysteresis of Hydrogen Sorption-Desorption in Hydrogen Accumulating Materials*: Thesis for a Doctor's degree. – Moscow, 2014. – pp. 246.

8. Shalygin M.G. Hydrogen and abrasion of pump part surfaces at hydrocarbon transfer // *Construction Site Engines and Road Machinery*. – 2014. – №4. – pp. 27–30.

9. Matyushenko V.Ya., Solovey N.F., Torop V.V. Investigation of hydrogen wear in piston-cylinder-unit of internal combustion engines // *Effect of Non-wear and Tribotechnology*. – 1997. – № 1. – pp. 33–39.

Рецензент д.т.н. А.Ю. Албагачиев



Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

Журнал «Научно-технические технологии в машиностроении» читают руководители и специалисты предприятий машиностроительного комплекса.

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

- найти партнеров, заинтересованных в современных исследованиях, а также внедрении Ваших идей и разработок в области машиностроения;
- установить контакты с организациями и фирмами России и стран ближнего и дальнего зарубежья;
- наладить обмен информацией.

Обращайтесь в редакцию! E-mail: naukatm@yandex.ru